

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

SYSTÈME ÉLECTROTHERMIQUE DE DÉGIVRAGE
POUR UNE PALE D'ÉOLIENNE :
SIMULATIONS EN SOUFFLERIE RÉFRIGÉRÉE ET IMPACT
SUR LA PUISSANCE PRODUITE

MÉMOIRE Présenté à
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

Comme exigence partielle du programme de maîtrise en ingénierie
Pour l'obtention du grade de maître en sciences appliquées
(M. Sc. A.)

Par
CHRISTINE MAYER

AOÛT, 2007

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

À mes merveilleux parents.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma plus sincère gratitude à mes directeur et co-directeurs de recherche : Jean Perron, Adrian Ilinca et Guy Fortin pour la confiance qu'ils m'ont accordée dans ce projet, pour leur soutien et pour avoir su constituer une équipe complémentaire, scientifiquement et humainement. Je remercie très chaleureusement les techniciens du LIMA, à l'Université du Québec à Chicoutimi, Martin Truchon et Carol Mercier pour leur travail toujours consciencieux et leur disponibilité. Merci aussi à Charles-Alexandre Drapeau, technicien à l'université du Québec à Rimouski pour l'usinage des moules du profil. Je remercie tout particulièrement Jaques Bodart, spécialiste en matériaux composites, pour la formation de qualité que j'ai reçue et pour l'aide qu'il m'a apportée dans la fabrication de mes pièces en fibre de verre.

Merci également aux étudiants de maîtrise et doctorat du LREE de l'UQAR pour les bons moments passés ensemble, autant à l'université qu'en dehors. Merci aux employés du LIMA pour leur gentillesse, leur accueil et la bonne ambiance qu'ils savent entretenir au laboratoire.

Je souhaite remercier tous les amis qui sont entrés dans ma vie ces deux dernières années et qui ont rendu cette aventure au Québec si agréable : Clément Hochart, Johannie Beaudoin, Benoit Morissette, Gaëtan Gouez, Andrès Castro, Élisabeth Crook et tous les autres qui se reconnaitront dans ces lignes.

C'est plus encore que des remerciements que j'adresse à Caroline Blackburn et sa famille, pour m'avoir accueillie parmi eux comme ils l'ont fait et m'avoir fait vivre tant d'expériences à leurs côtés.

Et pour terminer je ne peux passer sous silence le soutien permanent de toute ma famille, mes parents qui me font confiance et qui m'aident toujours du mieux qu'ils le peuvent, mon frère et ma sœur qui me manquent.

RÉSUMÉ

Dans le cadre de l'amélioration des conditions d'opération des éoliennes en climat nordique, le dégivrage des pales est une problématique majeure, autant pour les problèmes de performances que pour des raisons de sécurité, car des morceaux de glace volumineux peuvent être éjectés très loin par les pales. Des systèmes de dégivrage sont nécessaires pour éviter de devoir arrêter les éoliennes en période de givrage. Parmi les différents systèmes de dégivrage existants, inspirés principalement du domaine aéronautique, le système de dégivrage électrothermique est le plus prometteur en termes de qualité de dégivrage. Malgré des résultats très encourageants en exploitation, aucun test en laboratoire n'a encore été publié sur les performances de ce type de système. C'est pourquoi un montage expérimental d'un système électrothermique de dégivrage des pales d'éoliennes a été conçu et fabriqué pour réaliser des essais en soufflerie réfrigérée en conditions de précipitations givrantes.

Le montage expérimental consiste en une section de pale, fabriquée avec les mêmes matériaux que ceux utilisés dans l'industrie éolienne et instrumentée à l'aide de 12 thermocouples. 4 d'entre eux sont situés à l'intérieur du profil afin de mesurer la température interne et de quantifier les pertes thermiques internes et 8 sont sur la surface de la section de pale et servent à contrôler les 12 éléments chauffants placés sur le bord d'attaque et le bord de fuite du profil. Ce montage est relié à un boîtier électrique qui gère l'énergie apportée aux éléments chauffants. Ce boîtier est connecté à l'ordinateur dans lequel un programme en Visual Basic contrôle le chauffage à partir de la température de surface et enregistre les différentes températures mesurées et puissances consommées. La loi de commande du chauffage est basée sur une analogie avec le transfert de chaleur convectif.

Les conditions expérimentales de givrage sont obtenues à partir de la mise à l'échelle d'un évènement de givrage mesuré sur la station météorologique de Murdochville en Gaspésie (Québec). Les températures de surface et consommations de puissance de la section de pale sont enregistrées tout au long de l'essai. Les enregistrements permettent d'observer les phénomènes qui se produisent lors du givrage et l'évolution de la température et de la puissance consommée lors du dégivrage sur le bord d'attaque et le bord de fuite. Ces enregistrements permettent également d'étudier l'impact

des différents éléments de la soufflerie sur la puissance consommée et d'optimiser les paramètres du dégivrage qui interviennent dans la loi de puissance.

Les formes de glace accumulées en givrage puis en dégivrage, ainsi que leur effet sur les propriétés aérodynamiques de la pale, sont analysées. Elles permettent de quantifier la production énergétique d'une éolienne recouverte des profils de glace obtenus lorsque le système de dégivrage est arrêté et lorsqu'il fonctionne. Puis ces résultats sont comparés avec la consommation de puissance du système de dégivrage afin d'estimer le gain ou la perte énergétique du système de dégivrage.

À terme, les résultats obtenus avec le montage expérimental permettront d'étudier la rentabilité du système de dégivrage lors de la phase de conception d'un parc éolien en fonction des conditions climatiques propres au site d'installation du parc.

ABSTRACT

In order to improve the working conditions of wind turbines in cold climate, the blades de-icing is a major problem for both performances and security issue because ice fragments can be ejected far away from the turbine by the rotating blades. De-icing systems are essentials to avoid stopping the turbine during icing events. The electro thermal de-icing is the most promising system in terms of de-icing quality among all the existing de-icing systems, which are principally inspired from the aircraft field. In spite of encouraging results in use, no laboratory test about the system performances has been published yet. That's why an experimental set-up of an electro thermal de-icing system for wind turbine blades has been designed and built in order to perform experiments in a refrigerated wind tunnel under icing conditions.

The experimental set-up consists in a blade section built in the same materials as in the wind turbines industry and instrumented with 12 thermocouples. 4 of them are located inside the airfoil so as to measure the internal temperature and quantify the internal thermal losses. The other 8 are on the airfoil surface and are used to control the 12 heating strips located on the leading edge and on the trailing edge of the airfoil. This set-up is linked to an electric box that manages the power sent to the heating strips. This box is connected to the computer in which a Visual basic program controls the heating from the surface temperature and save the different temperatures and heating powers consumed. The law leading the heating is based on an analogy with the convective heat transfer.

The experimental icing conditions are obtained from the scaling of an icing event recorded by the meteorological station of Murdochville in Gaspésie (Québec). The surface temperatures and power consumptions of the airfoil are saved during the whole experiment. The records allow the observation of different phenomenon occurring during the icing and the examination of the temperature and power consumption evolution on the leading edge and trailing edge. Moreover, these records permit the study of the impact of different parts of the wind tunnel on the power consumption and the optimisation of the de-icing parameters that take part in the heating power law.

The ice shapes obtained in icing then in de-icing and their effect on the blade aerodynamic properties are analysed. At this time it is possible to quantify the power production of a wind

turbine covered with these ice shapes. The results are compared with the power consumption of the de-icing system in order to estimate the energetic gain or loss of the de-icing system for the wind turbine production.

At the end, the results obtained with this experimental set-up will allow the study of the de-icing system pay-back from the designing phase of a wind farm depending on the meteorological conditions of the site.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT.....	vi
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS	xvii
CONTEXTE GÉNÉRAL DU PROJET.....	1
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	3
1.1 Mise en situation	3
1.2 Le givrage	4
1.3 Les effets du givre sur les pales d'éoliennes.....	6
1.4 Techniques d'analyse du phénomène de givrage.....	11
1.4.1 Analyse numérique	11
1.4.2 Analyse expérimentale.....	12
1.5 Les systèmes de dégivrage	12
1.5.1 Le revêtement des pales	13
1.5.2 Le dégivrage par micro-ondes	14
1.5.3 Le dégivrage pneumatique	17
1.5.4 L'électro-expulsion	19
1.5.5 Le chauffage par air chaud.....	20
1.5.6 Le dégivrage électrothermique	20
1.5.7 Comparaison et évolution des systèmes de dégivrage	24
1.6 Résultats aérodynamiques de la littérature sur les profils givrés.....	26
1.6.1 Impact des formes de glace lors du givrage.....	26
1.6.2 Étude du Risø sur l'impact de la rugosité de surface	30
1.6.3 Impact du dégivrage.....	31

1.7	Objectifs et méthodologie	32
1.7.1	Objectifs	32
1.7.2	Méthodologie	33
1.7.3	Limites du projet	34
CHAPITRE 2 CONCEPTION DU MONTAGE EXPERIMENTAL		36
2.1	La section de pale.....	36
2.1.1	La modélisation de l'éolienne.....	36
2.1.2	Fabrication des pales dans l'industrie	39
2.1.3	Fabrication du profil pour le montage expérimental.....	41
2.2	Contrôle et régulation du système de chauffage	45
2.2.1	Le circuit électrique	45
2.2.2	Régulation du chauffage	48
2.2.3	Transfert de la valeur de l'angle d'amorçage	50
2.3	Paramètres de commande du chauffage.....	51
2.3.1	Instrumentation du profil	51
2.3.2	Améliorations apportées	54
2.3.3	Loi de commande du système de chauffage	56
2.3.4	Fonctionnement du contrôle du chauffage.....	58
2.4	Fonctionnement de la soufflerie.....	59
CHAPITRE 3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX		64
3.1	Les conditions expérimentales et la similitude	64
3.1.1	Conditions météorologiques	64
3.1.2	Conditions de l'éolienne	66
3.1.3	Conditions de similitude	67
3.1.4	Conditions de chauffage	72
3.1.5	Conditions expérimentales.....	73
3.2	Étalonnages	75
3.3	Essais préliminaires	75
3.4	Impact des paramètres de la soufflerie.....	76

3.5	Reproductibilité des tests	78
3.6	Étude et optimisation du chauffage.....	80
3.6.1	Calcul de la puissance	80
3.6.2	Fréquence d'échantillonnage et réactivité du système.....	81
3.6.3	Optimisation du coefficient de transfert de chaleur h_1	86
3.6.4	Impact de la température cible T_c sur le chauffage.....	88
3.7	Analyse des variations de la température.....	90
3.8	Analyse des variations de la puissance consommée	95
3.9	Résultats en termes de dégivrage	98
3.9.1	Particularités du profil.....	98
3.9.2	Formes de glace des essais préliminaires.....	101
3.10	Effet des parois	105
3.10.1	Zone latérale.....	105
3.10.2	Effet de bord	106
3.11	Essais à -10 °C	106
3.11.1	Conditions de chauffage optimisées	106
3.11.2	Analyse des températures enregistrées	107
3.11.2.1	Température au cours des tests de givrage	107
3.11.2.2	Température au cours des tests de dégivrage.....	111
3.11.3	Puissance mesurée	113
3.11.4	Résultats en terme de dégivrage	115
CHAPITRE 4 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS.....		122
4.1	Vitesse du vent et coefficient de transfert de chaleur local	122
4.2	Flux thermique dirigé vers l'intérieur du profil	126
4.3	Résultat global pour la pale.....	127
4.3.1	Résultats aérodynamiques.....	128
4.3.2	Évolution des masses de glace accumulées	128
4.3.3	Formes de glace	131
4.3.4	Pertes de puissance des pales avec et sans dégivrage	133

4.4	Estimation de consommation de puissance du dégivrage	135
4.5	Le système de dégivrage JE-System	139
4.5.1	Principe de fonctionnement	140
4.5.2	Utilisation et entretien du système	142
4.5.3	Performances du système.....	142
4.6	Limites et validité des résultats obtenus en soufflerie	145
4.7	Rentabilité du système	146
CONCLUSION.....		147
RECOMMANDATIONS		150
TRAVAUX FUTURS.....		152
BIBLIOGRAPHIE.....		153
ANNEXE A DOCUMENTATION TECHNIQUE SUR LA FIBRE DE VERRE		158
ANNEXE B INTERFACE DU PROGRAMME VISUAL BASIC		162
ANNEXE C LA SOUFFLERIE		163
ANNEXE D ÉTALONNAGES.....		164
D.1	Étalonnage des teneurs en eau dans la zone d'essais	164
D.1.1	Principe	164
D.1.2	Étalonnage 1.....	165
D.1.3	Étalonnage 2.....	167
D.1.4	Étalonnage 3.....	168
D.2	Étalonnage des thermocouples.....	172
D.3	Étalonnage de l'angle d'attaque du profil	173
ANNEXE E CONDITIONS EXPÉRIMENTALES (DÉTAILS)		174

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1. Comparaison des systèmes	24
Tableau 2-1. Caractéristiques de l'éolienne.	36
Tableau 2-2. Calcul de l'épaisseur du profil.	43
Tableau 2-3. Propriétés mécaniques des tissus de fibre de verre utilisés.	43
Tableau 3-1. Évènements de givre considérés.	65
Tableau 3-2. Caractéristiques de l'évènement de givrage considéré pour les tests.....	65
Tableau 3-3. Position radiale et corde réelles correspondant aux vitesses choisies pour les tests.	67
Tableau 3-4. Conditions de givrage mises à l'échelle.....	71
Tableau 3-5. Valeur du coefficient de transfert convectif pour les différentes vitesses.....	72
Tableau 3-6. Conditions expérimentales pour la deuxième série de tests (dégivrage).	74
Tableau 3-7. Conditions expérimentales pour la deuxième série de tests (givrage).	75
Tableau 3-8. Puissance moyenne pour deux essais identiques	80
Tableau 3-9. Comparaison des puissances consommées en fonction de la fréquence du calcul.	83
Tableau 3-10. Puissance moyenne consommée à -1.5 °C.....	87
Tableau 3-11. Puissance moyenne consommée par les essais 2-4.5-4 et 2-4.5-5.	89
Tableau 3-12. Températures moyennes lors des essais de givrage et dégivrage.	112
Tableau 3-13. Puissance moyenne consommée par chaque élément chauffant.	114
Tableau 4-1. Valeurs de h_1 utilisées pour les essais.	126
Tableau 4-2. Flux thermique moyen à travers le profil.....	127
Tableau 4-3. Conditions expérimentales de Hochart [33].....	132
Tableau 4-4. Rapports de similitude.	138
Tableau 4-5. Rapport des dimensions du montage et de la pale.	145

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1. Modification du profil et de la rugosité de la pale dus à l'accrétion de glace.	6
Figure 1-2. Répartition asymétrique du givre sur les trois pales.	7
Figure 1-3. Dégivrage manuel d'une éolienne en hiver.	8
Figure 1-4. Givrage hors production (à gauche) et en production (à droite) [3].	9
Figure 1-5. Forces de cisaillement hors production (à droite) et en production (à gauche) [3].	9
Figure 1-6. Calcul des risques de chute de glace transposés sur une carte topographique.	10
Figure 1-7. Revêtement de couleur noir utilisé pour favoriser le dégivrage [17].	14
Figure 1-8. Système global de chauffage par micro-ondes [18].	15
Figure 1-9. Principe de chauffage par micro-ondes de LM Glasfiber [18].	15
Figure 1-10. Système avec générateurs micro ondes à la base de la pale [18].	16
Figure 1-11. Système de dégivrage installé sur la tour [18].	17
Figure 1-12. Système de dégivrage pneumatique utilisé en aéronautique.	18
Figure 1-13. Avions ZODIAC équipés de dégivreurs pneumatiques.	18
Figure 1-14. Essai du système de déglacage par Hydro-Québec.	19
Figure 1-15. Système de chauffage par air chaud développé par ENERCON.	20
Figure 1-16. Éléments chauffants sur le bord d'attaque des pales	21
Figure 1-17. Eolienne munie d'éléments chauffants sur le bord d'attaque [3].	22
Figure 1-18. Contraintes appliquées aux éléments chauffants sur la pale en rotation [3].	23
Figure 1-19. Pertes de portance et accroissement de la traînée en régime sec [25].	27
Figure 1-20. Propriétés aérodynamiques d'un profil NACA 4415 (différentes formes de givre). ...	28
Figure 1-21. Résultats du NACA 4415 transposés au NACA 63-415.	29
Figure 1-22. Résultats aérodynamiques sur le givrage du profil NACA 63 415.	29
Figure 1-23. Types de collants antidérapants utilisés par le Risø.	30
Figure 1-24. Profil avec rugosités.	30
Figure 1-25. Coefficients de portance et de traînée (α à différentes positions sur le bord d'attaque).	31
Figure 2-1. Coefficient de puissance et puissance électrique de la Vestas V80 de 1.8 MW.	37
Figure 2-2. Profils aérodynamiques de la pale Vestas V80	37
Figure 2-3. Profil NACA 63 415.	38
Figure 2-4. Angle de vrillage de la pale.	39

Figure 2-5. Fabrication des pales chez NEG Micon [32].....	40
Figure 2-6. Fabrication d'une pale de 40 m chez Fiberblade Eolica (gauche) et chez Bonus (droite).	41
Figure 2-7. Dimensions géométriques de la section de pale.	41
Figure 2-8. Différents tissus de verre. Mat (3), mat/sergé (2) et sergé (1).....	42
Figure 2-9. Pièce après démoulage, vue de dessus (à droite) et de dessous (à gauche).....	45
Figure 2-10. Schéma du circuit électrique.	46
Figure 2-11. Boîtier électrique.	47
Figure 2-12. Effet de l'angle d'amorçage sur le signal.	48
Figure 2-13. Méthode itérative de Newton-Raphson.	49
Figure 2-14. Transfert de l'angle d'amorçage de l'élément i au microcontrôleur.	50
Figure 2-15. Sectionnement fictif du profil.....	51
Figure 2-16. Répartition des éléments chauffants et des thermocouples sur le profil.....	52
Figure 2-17. Vue de l'intérieur de la section de pale.	53
Figure 2-18. Section de pale utilisée pour les essais.	53
Figure 2-19. Section de pale installée dans la zone d'essais.	54
Figure 2-20. Isolation des thermocouples.	55
Figure 2-21. Modification de la prise des fils de thermocouples.	55
Figure 2-22. Modèle du transfert thermique autour du profil.	57
Figure 2-23. Schéma du fonctionnement du système.	58
Figure 2-24. Description de la soufflerie réfrigérée.....	59
Figure 2-25. Rampe de gicleurs. (Vue de dos à gauche et de face à droite)	60
Figure 2-26. Boîtier de contrôle de la soufflerie et panneau de contrôle du débit des gicleurs.	60
Figure 2-27. Gestion de la pression d'eau dans la soufflerie.	61
Figure 2-28. Système global de gestion de l'eau sous pression dans la soufflerie.....	61
Figure 2-29. Zone d'essais de la soufflerie.	62
Figure 3-1. Vitesse du vent au niveau du profil.	66
Figure 3-2. Interface du logiciel de mise à l'échelle.	71
Figure 3-3. Coefficient de transfert de chaleur convectif en fonction de la vitesse.	73
Figure 3-4. Effet de la rampe de gicleurs sur les thermocouples. (Essai 1-10-G1).....	76
Figure 3-5. Évolution des paramètres de la soufflerie au cours d'un essai. (Essai 3-3.5-3)	77
Figure 3-6. Comparaison des conditions expérimentales pour les essais 1-1.5-1 et 1-1.5-2.	78
Figure 3-7. Puissance consommée essais 1-1.5-1 et 1-1.5-2.....	79

Figure 3-8. Détail des variations de puissance lors de l'essai 3-0-3.	81
Figure 3-9. Évolution de la température de l'air pour la comparaison des puissances.	82
Figure 3-10. Consommation de puissance essai 1-1.5-3.	83
Figure 3-11. Histogramme des puissances consommées pour chaque élément.	84
Figure 3-12. Comparaison de l'évolution de la température à fréquence de contrôle variable.	85
Figure 3-13. Évolution de la température de surface selon la fréquence d'échantillonnage.	86
Figure 3-14. Puissance moyenne consommée par les essais à -1.5 °C à h_1 variable.	87
Figure 3-15. Puissance consommée pour H0 et H1.	88
Figure 3-16. Température de surface essais 2-4.5-4 et 2-4.5-5.	89
Figure 3-17. Température mesurée par les thermocouples externes lors de l'essai 3-0-G1.	91
Figure 3-18. Température mesurée par les thermocouples internes lors de l'essai 3-0-G1.	91
Figure 3-19. Températures mesurées par les thermocouples de l'extrados (0 et 3).	93
Figure 3-20. Températures mesurées par les thermocouples de l'intrados (1 et 2).	93
Figure 3-21. Évolution de la température de surface du profil pour l'essai 1-0-1.	94
Figure 3-22. Évolution de la température interne du profil pour l'essai 1-0-1.	95
Figure 3-23. Puissance envoyée dans l'élément chauffant 1 lors de l'essai 1-0-1.	96
Figure 3-24. Puissance envoyée dans les éléments chauffants lors de l'essai 1-0-1.	97
Figure 3-25. Impact de l'écart entre les éléments chauffants pour les essais 3-0-1 et 3-3.5-1.	99
Figure 3-26. Impact de l'épaisseur des éléments chauffants sur l'accrétion de glace.	100
Figure 3-27. Impact de l'épaisseur des divers éléments sur le givrage. (Essai 2-4.5-G1)	100
Figure 3-28. Accumulation de glace lors de l'essai 3-0-G1.	102
Figure 3-29. Accumulation de glace lors de l'essai 3-0-G4.	102
Figure 3-30. Répartition du givre lors de l'essai 1-6.5-G1.	103
Figure 3-31. État du bord d'attaque en fonction du coefficient de transfert thermique.	104
Figure 3-32. Comparaison des résultats des essais 2-4.5-G1 et 2-4.5-4.	105
Figure 3-33. Détail des variations de puissance lors des essais 3-10-3 et 3-0-3.	107
Figure 3-34. Température enregistrée à la surface du profil pour l'essai 1-10-G2.	108
Figure 3-35. Température interne pour l'essai 1-10-G2.	109
Figure 3-36. Température interne de l'essai 2-10-G1.	110
Figure 3-37. Température interne de l'essai 3-10-G1.	110
Figure 3-38. Courbes de puissance et température pour l'essai 1-10-3.	111
Figure 3-39. Température interne lors de l'essai 2-10-3.	112

Figure 3-40. Puissance consommée pour l'essai 1-10-1.....	114
Figure 3-41. Formes de glace pour les essais 1-10-G et 1-10-3 à 20 m/s.	116
Figure 3-42. Formes de glace pour les essais 2-10-G et 2-10-3 à 30 m/s.	116
Figure 3-43. Formes de glace pour les essais 3-10-G et 3-10-3 à 40 m/s.	116
Figure 3-44. Profil givré lors de l'essai 1-10-G2.....	117
Figure 3-45. Profil givré lors des essais 2-10-G2.....	118
Figure 3-46. Profil givré lors de l'essai 3-10-G1.....	119
Figure 3-47. Détail de l'élément 0 après dégivrage pour les essais 1-10-3, 2-10-3 et 3-10-3.	120
Figure 3-48. Intrados du profil pour les essais 1-10-3, 2-10-3 et 3-10-4.	120
Figure 4-1. Vitesse sur le profil dans la zone d'essai.....	123
Figure 4-2. Température à la surface du profil dans la zone d'essai.....	124
Figure 4-3. Coefficient de transfert de chaleur convectif calculé par LIMA Icing2D.....	125
Figure 4-4. Masse de glace accumulée lors des essais de givrage à -10 °C.....	129
Figure 4-5. Évolution de l'accumulation de glace sur la pale à -10 °C.....	129
Figure 4-6. Évolution de l'accumulation de glace sur une pale [28].....	130
Figure 4-7. Évolution du taux d'accumulation de glace d'après le logiciel TURBICE [6].....	130
Figure 4-8. Forme des dépôts de glace le long de la pale.	131
Figure 4-9. Masse et formes des dépôts de glace en régime humide [25].	132
Figure 4-10. Formes des dépôts de glace en régime sec avec dégivrage.	133
Figure 4-11. Production de puissance calculée pour une éolienne de 500 kW [44].	134
Figure 4-12. Courbe de puissance de profils givrés.....	134
Figure 4-13. Évolution de la puissance moyenne consommée par les éléments chauffants.	136
Figure 4-14. Thermocouple $Th_c 0$ isolé de l'écoulement par une corne de glace.	136
Figure 4-15. Évolution de la puissance moyenne consommée par les éléments chauffants.	137
Figure 4-16. Zones de chauffage sur la pale.	138
Figure 4-17. Répartition du chauffage le long de la pale.....	139
Figure 4-18. JE-System dans la nacelle d'une éolienne.....	140
Figure 4-19. Fonctionnement du thermostat du JE-System (Taux d'échantillonnage 1 Hz) [46]. .	141
Figure 4-20. Évènement de givrage à Olostrunturi-fell (Nord de la Finlande) [44].	143
Figure 4-21. Consommation d'énergie du JE-System à Suorva (Finlande) [6].	144

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

A	Surface de l'élément chauffant	m ²
b	Chaleur relative	J
b	Angle de vrillage	°
c	corde du profil	m
c _p	Coefficient de puissance de l'éolienne	
$c_{p,a}$	Chaleur spécifique de l'air	J/Kg/K
$c_{p,w}$	Chaleur spécifique de l'eau	J/Kg/K
d _c	Diamètre du bord d'attaque (dans le cas d'un profil)	m
E	Module d'Young (ou d'élasticité)	N/mm ²
F _{ai}	Force aérodynamique agissant sur la glace accumulée	N
G	Module de Coulomb (ou d'élasticité transversale)	N/mm ²
h _l	Coefficient de chauffage	W/K
LWC	Teneur en eau liquide	g/m ³
m_{ice}	Masse de glace accumulée	kg
MVD	Diamètre volumétrique médian	m
P _{vent}	Puissance disponible dans le vent	W
P _{rotor}	Puissance produite par l'éolienne	W
Q_f	Chaleur de solidification	kJ/kg
Q_{ss}	Chaleur sensible	kJ/kg
Q_{dif}	Chaleur de diffusion	kJ/kg
Q_{cv}	Chaleur de convection	kJ/kg
Q_{adh}	Chaleur adiabatique	kJ/kg
Q_{kin}	Chaleur cinétique	kJ/kg
RPM	Rotations Par Minutes	tr/min
R	Rayon de la pale	m
r	Position radiale sur la pale	m
S	Surface balayée par les pales en rotation	m ²

t	temps d'accrétion ou durée de l'évènement de givrage	min
T_a	Température de l'air	K
T_c	Température cible à la surface du profil	K
T_0	Température statique durant l'évènement	K
T_f	Température de solidification de l'eau	K
T_s	Température de surface	K
$Th_e 0$	Température du thermocouple 0 à l'extérieur du profil	K
$Th_i 0$	Température du thermocouple 0 à l'intérieur du profil	K
U_{rel}	Vitesse relative du vent sur la pale	m/s
U_{rot}	Vitesse de rotation de l'éolienne	m/s
U_s	Vitesse du vent à la surface du profil	m/s
U_w	Vitesse du vent arrivant sur les pales	m/s
VAC	Volts Alternating Current. Tension en courant alternatif.	V
VDC	Volts Direct Current. Tension en courant continu	V
α	Angle d'attaque	°
β	Angle de callage	°
λ	Coefficient de conductivité thermique	W/m/K
μ_{air}	viscosité dynamique de l'air	kg/m/s
ρ_{air}	Densité de l'air	kg/m ³
ρ_w	Densité de l'eau	kg/m ³
ρ_i	Densité de la glace	kg/m ³
σ	Contrainte d'élasticité	Pa
$\sigma_{w/s}$	Tension de surface de l'eau	N/m
ν	Coefficient de Poisson	
φ	Angle de pas	°
ω	Vitesse angulaire du rotor	rad/s

CONTEXTE GÉNÉRAL DU PROJET

L'énergie électrique est indispensable à notre mode de vie pour s'éclairer, se chauffer, faire fonctionner les industries, les ordinateurs et tous les appareils ménagers. Les différentes sources d'énergie, diesel, au charbon, hydraulique, nucléaire, et depuis peu solaire et éolienne, sont donc de plus en plus sollicitées. Certaines formes de production, très polluantes, posent problème pour l'avenir et affectent notre milieu de vie, mais la grande connaissance que l'on possède de leur mise en œuvre est sécurisante. Les énergies renouvelables, quant à elles, sont non polluantes et la source primaire de l'énergie, le soleil, est totalement gratuite. Leur exploitation reste cependant récente et limitée, du fait surtout des contraintes techniques parfois longues et laborieuses à éliminer.

L'énergie éolienne se sert de la seule force du vent, ressource naturelle et inépuisable, pour produire de l'électricité. C'est pourquoi, de nombreux pays, dont le potentiel éolien est très intéressant, se tournent de plus en plus vers ce type de ressource, d'autant plus que le coût de production de cette énergie devient de plus en plus compétitif. Au Canada, par exemple, la capacité de production du domaine éolien s'est accrue de 54% en 2005 pour atteindre 683 MégaWatt (MW), alors que les orientations gouvernementales devraient favoriser l'installation d'au moins 8000 MW d'ici 2015 et ainsi porter à environs 16% la part de l'éolien dans l'énergie totale produite. Mais le Canada en est encore à ses débuts dans le domaine quand on sait que l'Allemagne possède déjà 18 100 MW, l'Espagne 9 825 MW, les États Unis 8 957 MW et l'Inde 4 225MW [1]. En dépit de son utilisation active, l'énergie éolienne fait l'objet de nombreuses recherches car tous les problèmes techniques liés à son exploitation ne sont pas encore résolus.

La difficulté de l'exploitation d'une éolienne réside majoritairement dans la transformation d'une énergie qui varie constamment en une énergie stable, utilisable par tous. Mais l'éolienne demeure un système mécanique exposé aux conditions climatiques les plus sévères. Dans le cadre de l'exploitation des éoliennes en climat nordique, le givrage constitue un problème majeur car il altère le fonctionnement global de la machine, diminue la durée de vie de tous les composants et impose bien souvent l'arrêt complet de l'éolienne. Des bris de pales, de génératrices et même de tours ont été observés en raison de la surcharge mécanique. Le chauffage de la nacelle est nécessaire pour le fonctionnement d'éléments mécaniques tels que la boîte de vitesse ou la génératrice. La qualité de

la lubrification des pièces mécaniques est diminuée par le froid, ces éléments doivent donc baigner dans des fluides (huile, graisse) spécialement conçus pour les basses températures. Pour les pales, le dégivrage est important, en raison de tous les effets néfastes du givre sur le profil aérodynamique et des surcharges et vibrations induites par la masse de glace répartie inégalement.

Le contexte scientifique et industriel, la problématique, les objectifs et les aspects méthodologiques du projet de recherche sont introduits dans le premier chapitre. Une brève présentation des différentes technologies de dégivrage est aussi présentée.

Le chapitre 2 donne les détails de la conception du montage expérimental. Partant de l'éolienne, la modélisation et la mise à l'échelle de la pale et de ses conditions d'opération sont décrites. La fabrication de la section de pale et du système de dégivrage ainsi que les choix technologiques les concernant sont explicités. Le contrôle et la régulation du système de chauffage ainsi que le traitement informatique des données sont détaillés. Enfin, la soufflerie utilisée pour l'expérimentation et son fonctionnement sont présentés.

Le chapitre 3 expose les résultats expérimentaux obtenus après avoir défini les conditions expérimentales de givrage utilisées dans la soufflerie. L'étude et l'optimisation des différents paramètres de contrôle et régulation du chauffage y sont détaillés.

Le chapitre 4 présente l'interprétation des résultats, leurs limites et l'utilisation qui peut en être faite. L'interprétation, d'un point de vue aérodynamique, des formes de givre obtenues est étudiée, de même que l'extrapolation des résultats pour une pale réelle et l'estimation de consommation du système à l'échelle d'une éolienne. Une comparaison avec les résultats du système de dégivrage électrothermique du Finnish Meteorological Institute est réalisée.

Finalement, diverses conclusions et recommandations qui découlent de ce travail sont émises.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en situation

Au Canada comme dans toutes les régions de climat froid, c'est en hiver que les vents sont généralement les plus forts et que la densité de l'air est la plus élevée. La puissance disponible dans le vent est proportionnelle à la densité de l'air et au cube de la vitesse du vent. Elle augmente donc en hiver :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot S \cdot U_w^3 \quad (1)$$

La densité de l'air est proportionnelle à la pression et inversement proportionnelle à la température. Par conséquent, la production des éoliennes augmente en hiver, lorsqu'il fait plus froid [2]. C'est aussi en hiver que la consommation d'électricité est la plus importante. Les régions isolées du globe, souvent les régions où les conditions climatiques sont les plus sévères, en hiver en particulier, pourraient tirer un immense profit de l'utilisation de l'énergie éolienne : la force du vent y est souvent importante et, une fois l'éolienne installée, il n'y a plus de problème d'approvisionnement en combustible, contrairement aux turbines diesel ou aux centrales au charbon.

Mais l'hiver est aussi une période caractérisée par de fortes turbulences, des températures très basses et des événements d'accumulation de glace fréquents. Les éoliennes, généralement conçues pour les climats tempérés comme ceux de l'Europe ou des États Unis, sont rarement adaptées à ces conditions d'exploitation sévères.

Dans certains cas et pour des températures très basses (-20°C et moins), les performances de l'éolienne peuvent être accrues. Les raisons de ce phénomène ne sont pas encore très bien connues, même si les variations de densité de l'air et du nombre de Reynolds sont évoquées. De tels phénomènes surchargent les éoliennes, ce qui a pour résultat d'endommager certaines composantes

mécaniques et électriques comme la génératrice, la boîte de vitesse et les roulements. Ces surcharges, ponctuelles mais importantes, réduisent la durée de vie de ces composantes de l'éolienne [2]. Les appareils de mesure qui servent au calcul de l'angle de calage fournissent des informations peu fiables lorsqu'ils sont gelés ou givrés et le système de contrôle a de la difficulté à ajuster cet angle. En raison de retards dans la modification de l'angle de calage, le transformateur et les bobines peuvent brûler dans la nacelle et mettre l'éolienne hors service [3].

Les éoliennes actuellement exploitées en climat nordique possèdent un système de chauffage pour la nacelle. Celui-ci est essentiel pour assurer le bon fonctionnement des organes principaux de l'éolienne, comme la génératrice, la boîte de vitesse et les panneaux électroniques, afin de maintenir ces zones à une température d'opération optimale. Mais d'autres spécificités essentielles à une éolienne opérant en climat nordique sont moins souvent observées dans la pratique. Les pièces en acier doivent être fabriquées dans un acier spécialement étudié pour les basses températures car les aciers classiques deviennent plus fragiles lorsque la température diminue. Les pales doivent être dotées de systèmes de dégivrage, mais les conditions d'opération sévères et les pertes énergétiques importantes posent de multiples problèmes de conception.

1.2 Le givrage

Le givre est une couche fine et blanche de glace formée sur une surface froide par cristallisation de gouttes d'eau en état de surfusion. La glace, ou verglas, est, d'après « Le petit Robert de la langue française » 2006, de l'eau congelée formant un solide dur et translucide. Ces deux termes sont souvent substitués l'un à l'autre dans le langage courant car le givre et le verglas sont formés d'eau à l'état solide. En revanche, le taux de solidification (défini plus loin) n'est pas le même dans la formation du verglas et du givre. C'est pourquoi ils sont différenciés dans ce travail. Le terme givrage est cependant employé pour la formation de glace sur la pale, que ce soit, en réalité, du givre ou du verglas.

Le givrage naît de gouttelettes d'eau en surfusion présentes dans l'air qui heurtent la surface d'un objet, ici la surface d'une pale d'éolienne. Il y a surfusion lorsque l'eau est présente à l'état liquide en dessous du niveau de congélation. À l'impact, l'eau gèle en quelques millisecondes et forme des dendrites de glace qui croissent sur la surface. La vitesse de croissance de ces dendrites dépend du

degré de surfusion. Durant le processus d'accrétion, la rugosité qui se développe en raison de la solidification des gouttelettes influence le développement de la couche limite, laquelle affecte le taux de chaleur que l'environnement peut absorber ainsi que la quantité d'eau capturée et la forme du dépôt glace. Un des paramètres fondamentaux du phénomène de givrage est la teneur en eau liquide. Elle indique la quantité d'eau liquide contenue dans un volume donné d'air et elle est reliée au nombre de gouttelettes d'eau en surfusion présentes dans l'air, à sa vitesse et température. [4].

Le type de glace qui va se former sur un objet sous l'effet des conditions atmosphériques et météorologiques dépend principalement du taux de solidification. L'accrétion qui s'effectue à une température légèrement inférieure à la température de solidification de l'eau (0°C à pression atmosphérique normale) est ainsi classifiée selon trois régimes : sec, humide ou liquide, en fonction de la température de surface et de la fraction solide. La température de surface est déterminée par le bilan des échanges de chaleur et tient compte des changements de phase. La fraction solide est la proportion de la masse d'eau en phase liquide qui se solidifie lors de l'impact. Elle dépend de la quantité de chaleur latente de solidification qui peut être absorbée par l'air et par le substrat [4].

Les régimes d'accrétion sec et humide, qui ont lieu durant le givrage, ont des propriétés et des effets différents sur la pale, mais dans les deux cas, la portance diminue et la traînée augmente en raison de la forme du dépôt de glace et de sa rugosité ([5], [6] et [7]).

Dans le cas du régime d'accrétion sec, l'eau gèle en totalité lors de l'impact avec le profil en raison d'un taux de solidification suffisant. Ce taux dépend de la capacité du milieu ambiant à absorber la chaleur dégagée par la solidification de l'eau. Toute l'eau de la gouttelette en surfusion se solidifie avant l'arrivée d'une autre gouttelette au même endroit. La fraction solide vaut 1 et la température de surface est inférieure à la température de solidification de l'eau mais supérieure à celle de l'air. La glace est opaque et laiteuse, la densité est plus faible que dans le régime humide (environs 850 kg/m^3), en raison des bulles d'air emprisonnées dans la glace. La surface de la glace est alors rugueuse.

Dans le cas du régime d'accrétion humide, l'eau ne gèle pas totalement à l'impact en raison du taux de solidification insuffisant. Une certaine quantité d'eau de chaque gouttelette ruisselle sur le profil sous l'effet des forces aérodynamiques. La fraction solide est comprise entre 0 et 1 et la température

de surface avoisine la température de solidification de l'eau. La glace, alors appelée verglas, est translucide, très peu rugueuse et sa densité est élevée (917 kg/m^3).

Le régime d'accrétion liquide est caractérisé par une température de surface supérieure à la température de solidification de l'eau. L'eau s'écoule sur la surface sous forme de film ou de ruisseau de surface. Le substrat de glace fond sous l'effet du film d'eau. Ce régime apparaît lors du dégivrage. Le transfert de chaleur a lieu par conduction à la surface de la pale ou par convection, lorsque la température de l'air ambiant est supérieure à la température de solidification de l'eau ou encore, lorsque le soleil n'est pas caché, par radiation solaire.

La section suivante explique les effets du givre sur les pales. Au delà de la simple modification des propriétés aérodynamiques, la présence de givre sur la pale est néfaste à toutes les composantes de l'éolienne.

1.3 Les effets du givre sur les pales d'éoliennes

L'accumulation du givre sur les pales induit une baisse de puissance significative pour les éoliennes. Ce phénomène se produit même dans le cas de minces pellicules de glace, en raison de la grande sensibilité des pales à la rugosité [8]. La Figure 1-1 présente différentes formes d'accumulation de givre sur des pales d'éoliennes opérant en région nordique.

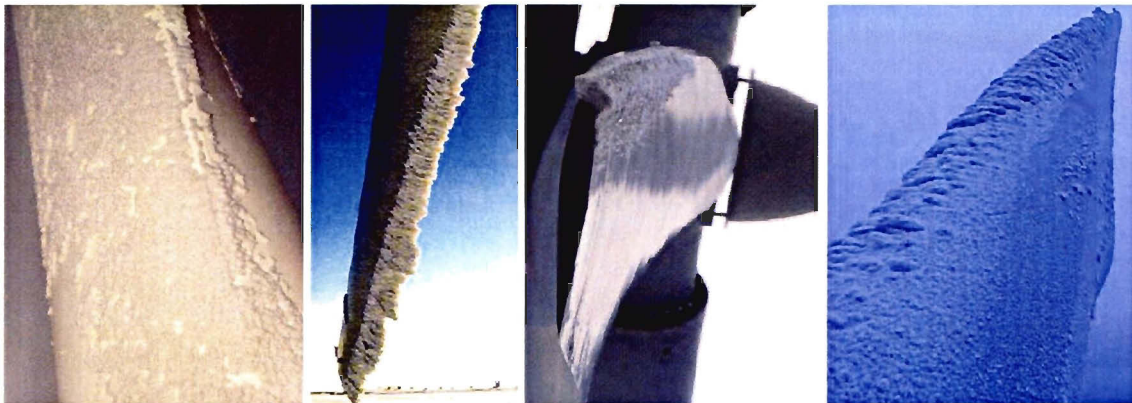


Figure 1-1. Modification du profil et de la rugosité de la pale dus à l'accrétion de glace.

Par ailleurs, les masses importantes de glace représentent une surcharge mécanique considérable sur toute la structure de l'éolienne. L'intégrité structurale de la turbine peut être affectée par des

résonances dues aux changements des fréquences naturelles de certains composants, excédant alors les valeurs de charge en fatigue prévues lors de la conception. En raison des forces gravitationnelles et des moments de flexion ajoutés par la présence de glace sur le profil, la pale est soumise à des contraintes statiques plus importantes [9]. La répartition de la glace sur les pales n'est pas équilibrée par rapport à l'axe de rotation de l'éolienne en raison des morceaux de glace éjectés par la pale (Figure 1-2).

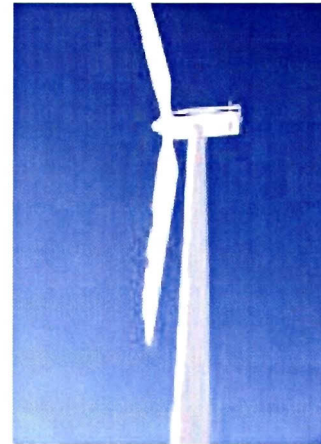


Figure 1-2. Répartition asymétrique du givre sur les trois pales.

Cette répartition de glace asymétrique est à l'origine de vibrations additionnelles qui peuvent impliquer l'arrêt de l'éolienne. Des capteurs de vibration sont installés sur la quasi-totalité des éoliennes pour limiter les dommages possibles ([8] et [3]).

Par ailleurs, on remarque que le taux d'accrétion de glace est plus important lorsque l'on s'éloigne du moyeu, en raison de la vitesse de l'air qui augmente avec le rayon de pale [3] :

$$\frac{m_{ice}}{t} = \beta \cdot LWC \cdot S \cdot U_w \quad (2)$$

L'arrêt d'une éolienne dû à un phénomène de givrage pose beaucoup de problèmes. D'une part, la production d'énergie est arrêtée et d'autre part, le redémarrage de l'éolienne n'est possible qu'une fois le givre disparu. Or le givre reste présent sur les pales longtemps après que les conditions de givre n'aient disparues car il nécessite une augmentation de la température au dessus du point de congélation pour fondre [8]. Un dégivrage manuel est souvent délicat à réaliser en raison des conditions climatiques sévères, de la hauteur des tours et de la longueur des pales (voir Figure 1-3).

Le coût d'une telle opération est important et l'accès aux éoliennes est difficile (routes impraticables, conditions météorologiques extrêmes, ...). De plus, avant d'être démarrées, certaines parties de l'éolienne doivent être chauffées afin d'atteindre une température minimale de mise en fonction.

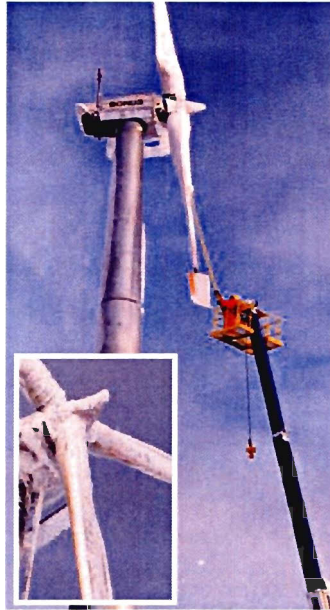


Figure 1-3. Dégivrage manuel d'une éolienne en hiver.

Tous ces facteurs ont amené les chercheurs et industriels du domaine éolien à s'interroger sur le problème de la suppression du givre sur les pales d'éoliennes. Celle-ci est possible par dégivrage, c'est-à-dire suppression de la glace accumulée sur la pale et par antigivrage, c'est à dire par prévention de l'accumulation de glace. Par soucis de simplicité, les deux méthodes seront désormais désignées par « dégivrage ».

Dans certaines régions, les éoliennes seraient immobilisées pendant des mois entiers sans système de dégivrage. A l'opposé, la présence humaine à proximité d'une éolienne (route, station de ski, zone touristique, agricole,...) peut aussi motiver l'installation d'un système de dégivrage pour des raisons de sécurité, et ce même si les phénomènes de givre sont rares et peu importants. En effet, des morceaux de glace peuvent être éjectés par l'éolienne jusqu'à plusieurs centaines de mètres. S'ils sont trop volumineux ils peuvent représenter un réel danger pour l'entourage, humain et matériel, de l'éolienne ([10] et [11]). Lors de la rotation de la pale, la glace s'accumule près du point de stagnation. Les forces aérodynamiques et les vibrations de la pale agissent sur le morceau

de glace en formation, augmentent et finissent par le briser. La glace continue de s'accumuler, un nouveau morceau de glace se développe à la place de celui qui a été éjecté et le processus se répète.

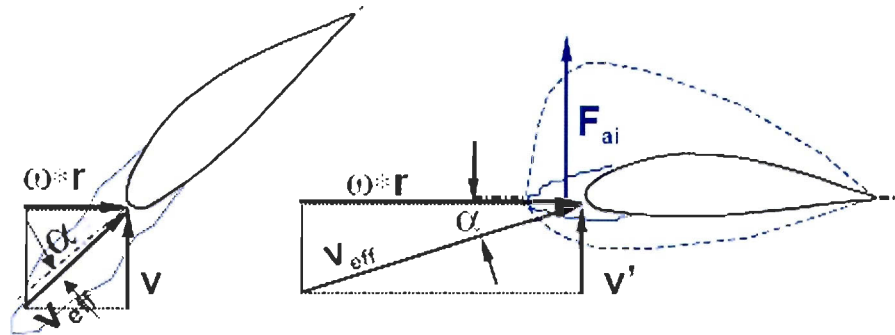


Figure 1-4. Givrage hors production (à gauche) et en production (à droite) [3].

L'effet de la vitesse de rotation de la pale et des forces aérodynamiques sur la géométrie de l'accrétion de glace et sur la cinématique globale du profil aérodynamique est illustré à la Figure 1-4. Le schéma de gauche montre la formation de glace sur une éolienne à très faible vitesse de rotation. Les forces aérodynamiques sont nulles et il n'y a pas de force centrifuge puisque la vitesse de rotation est proche de zéro. La résultante des vitesses du vent et de rotation du rotor est V_{eff} qui n'est pas orientée de la même façon selon que la vitesse de rotation du rotor est du même ordre de grandeur que celle du vent (cas de gauche) ou beaucoup plus importante (cas de droite). L'effet de la présence de glace est bien plus important dans le deuxième cas.

Par ailleurs, des forces de cisaillement plus importantes apparaissent sur les éoliennes à calage variable de pale (pitch control) entre la glace accumulée et la surface de la pale (Figure 1-5). Cependant, la glace se brise sous l'action des forces aérodynamiques et centrifuges avant que les forces de cisaillement ne soient assez importantes pour casser la glace.

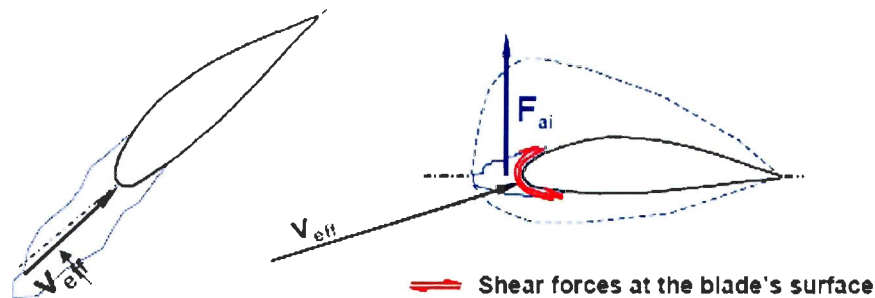


Figure 1-5. Forces de cisaillement hors production (à droite) et en production (à gauche) [3].

Les morceaux de glace ainsi éjectés peuvent être très volumineux et lourds (plusieurs kilogrammes) et être projetés à plusieurs centaines de mètres [12]. Les recherches effectuées à ce propos expliquent ce phénomène en détail et donnent des résultats qui démontrent le réel danger que représentent ces morceaux de glace. Les risques encourus sont quantifiables et il est donc possible de déterminer s'il existe un besoin en termes de dégivrage pour la sécurité de l'entourage de l'éolienne. La Figure 1-6 donne un exemple de la pertinence de ces calculs; dans certains cas et selon l'orientation et la vitesse du vent, un risque de chute de morceaux de glace sur la route à proximité de l'éolienne existe.



Figure 1-6. Calcul des risques de chute de glace transposés sur une carte topographique.

Durstewitz [13] estime par le calcul que, globalement, le risque d'être atteint par un morceau de glace éjecté d'une pale est insignifiant ($<10^{-7}$) à partir de 250 mètres d'une éolienne.

L'aspect économique est également un facteur à prendre en compte [8]. Le coût d'un système électrique de dégivrage est, dans les conditions actuelles, d'environ 5% de l'investissement total pour une éolienne de 600kW [14]. Mais ce ratio diminue pour de plus grosses éoliennes. De plus, le prix de l'électricité est un facteur important dans l'estimation de l'intérêt économique d'une telle installation. La consommation électrique du système comparée aux baisses de productions dues au givre permet d'estimer la rentabilité à long terme de l'investissement, si aucun critère de sécurité n'est considéré.

1.4 Techniques d'analyse du phénomène de givrage

Deux types de techniques d'analyse du givre et de son processus de formation ont été répertoriés : les méthodes numériques et les procédés expérimentaux. La présente section décrit en détails ces techniques.

1.4.1 Analyse numérique

Différents programmes ont été développés pour prédire le givrage dans le domaine de l'aéronautique sur une aile en deux dimensions, en régime sec et humide. Ils utilisent les conditions atmosphériques enregistrées sur des sites de mesure et dans les nuages, à savoir température et humidité relative dans l'air, pression barométrique, vitesse de vent, teneur en eau liquide de l'air (LWC), diamètre volumétrique médian (MVD) des gouttelettes d'eau en surfusion, afin de prédire la forme du dépôt de givre accumulé à partir du calcul successif de l'écoulement autour du profil, des trajectoires des gouttelettes d'eau, de l'efficacité de collection, du bilan de masse et transfert de chaleur à la surface de l'objet, des changements de géométrie et de la masse de glace accumulée. Les logiciels validés pour l'aéronautique, en deux dimensions, sont LEWICE aux États-Unis en 1995, CANICE en 1994, CIRAMIL au Québec en 1996, TRAJICE2 en Grande-Bretagne en 1992, ECLIPPS en France et FENSAP-3D au Québec en 2002, seul logiciel capable de modéliser l'accrétion sur une aile en trois dimensions. Le Finnish Meteorological Institute en Finlande développe le logiciel TURBICE pour le givrage des éoliennes. Les simulations des régimes d'accrétion sec et humide sont possibles à l'aide de ces logiciels, mais elles se basent sur l'équation de conservation de l'énergie de Messinger datant de 1953 [15] et le modèle thermodynamique du processus de croissance de la glace de Lozowski en 1979 [16]. Dans ces conditions, la phase liquide n'est pas simulée ce qui entraîne des simplifications qui limitent la qualité de prédiction de ces modèles.

Un logiciel, LIMA-icing2D, permet l'étude numérique du givrage pour les pales d'éoliennes. Il est actuellement développé au LIMA et comprend quatre modules distincts : écoulement, trajectoire des gouttelettes d'eau en surfusion, géométrie et calcul thermodynamique. Il repose sur le logiciel CIRAMIL, développé en partie par le LIMA, pour l'aviation. LIMA-icing2D est un modèle 2D½,

en développement, qui a pour objectif de prédire en 2D la forme des profils aérodynamique après l'accumulation de glace et ce pour différentes positions sur la pale.

1.4.2 Analyse expérimentale

L'analyse expérimentale du givrage peut se faire de deux façons. Une première méthode consiste à réaliser des mesures d'un phénomène réel de givrage, par l'intermédiaire d'une tour de mesure installée dans une région à fort potentiel givrant. Une seconde méthode consiste à reproduire en soufflerie réfrigérée des conditions de givrage mesurées sur site et à étudier la formation du givre qui en résulte.

1.5 Les systèmes de dégivrage

L'exploitation de l'énergie éolienne est relativement récente et par conséquent les recherches dans le domaine le sont encore plus. C'est donc tout naturellement que les chercheurs ont commencé par étudier les technologies de dégivrage développées dans les milieux où les problèmes de givrage sont similaires, en particulier l'aéronautique. En effet, avions et hélicoptères sont régulièrement soumis à des conditions de givrage, du fait qu'ils se déplacent en altitude et à des vitesses importantes. Les problèmes de sécurité liés au givrage sont de la plus haute importance sur de tels appareils : un avion en vol soumis au givre risque de s'écraser. Par conséquent, les recherches ont été, et sont encore, très actives dans ce domaine.

Par conséquent, beaucoup de systèmes de dégivrage, utilisés ou en étude, pour des applications sur les pales d'éoliennes sont inspirés de l'aviation. Ces systèmes sont tous très différents les uns des autres, autant pour la technologie qu'ils utilisent que pour leur mode de fonctionnement et sont, pour la plupart, en cours de développement. Chaque système de dégivrage est nécessairement associé à un système de détection du givre, qui n'est pas étudié ici, afin de réaliser l'asservissement du dégivrage et de contrôler le démarrage et l'arrêt du système [3]. Les problèmes liés à la détection du givre et à l'enregistrement des événements de givrage sont nombreux.

Différentes techniques pour dégivrer les pales d'éoliennes peuvent être utilisées. Elles sont le résultat de recherches en laboratoire et d'essais sur le terrain partout à travers le monde, dans les

régions nordiques et montagneuses, là où le givre est susceptible d'apparaître. Les systèmes de dégivrage peuvent être différenciés selon leur principe de fonctionnement : mécanique (incluant électromécanique), thermique ou par électro-expulsion.

1.5.1 Le revêtement des pales

Dans certaines régions, là où le givrage est léger, peu fréquent, si les périodes de givrage ont lieu pour des températures avoisinant 0°C ou encore dans des zones très ensoleillées en hiver, les pales peuvent être recouvertes d'un revêtement noir [8]. C'est une méthode de dégivrage utilisant l'énergie solaire, qui vient s'emmagasiner dans le revêtement, pour chauffer la surface de la pale et faire fondre la glace. Le revêtement, du fluorouréthane noir, est glaciophobe et la rugosité de la surface de la pale ainsi recouverte décourage la formation de glace (site internet). Son efficacité est assez limitée mais elle peut représenter un complément intéressant à une autre technique de dégivrage car sa consommation électrique est totalement nulle.

L'été, en revanche, ce type de revêtement pose problème car l'augmentation de la température de la pale peut nuire à sa propre structure. Par conséquent, cette méthode ne peut être utilisée n'importe où et peut impliquer la perte de la garantie du fabricant sur les pales. En effet, l'augmentation de la température de la pale entraîne une détérioration du matériau qui la constitue en raison de sa sensibilité aux hautes températures, et donc une diminution de ses propriétés mécaniques et de sa durée de vie. Cette méthode a cependant fait ses preuves au Yukon, en complément d'un système de chauffage des pales par élément chauffant [17]. Plusieurs compagnies commercialisent ce revêtement pour diverses applications. En particulier Polytech Services Company utilise sur les pales d'éoliennes, depuis 1989, le produit Staclean™ White dans les régions chaudes et Staclean™ Black en région nordique. Le coefficient de frottement de ce revêtement est plus faible que celui du teflon, il est flexible et résistant et peut être appliqué avec un outillage de peinture standard. Il donne de bons résultats, autant contre la présence d'insectes en milieu chaud (avec une coloration claire) en raison de la réduction de la rugosité des pales que contre le givre en climat froid (en noir, Figure 1-7) mais en dépit de ses propriétés annoncées glaciophobes, il n'est que partiellement efficace pour empêcher la formation de glace.

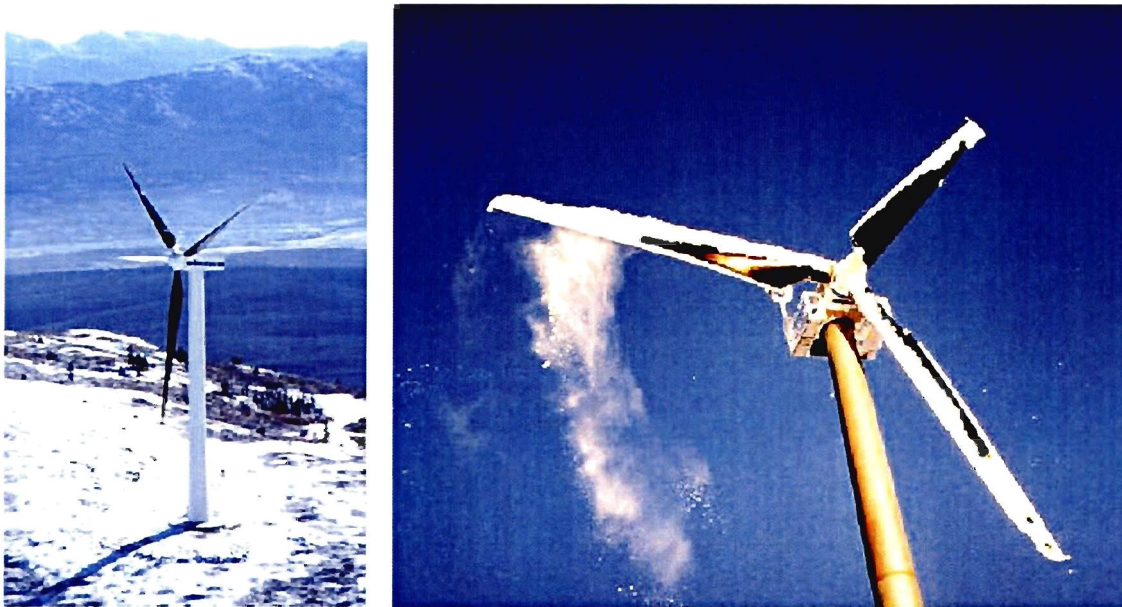
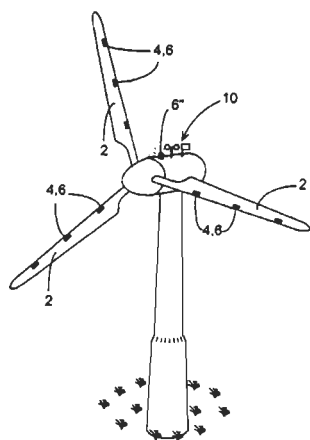


Figure 1-7. Revêtement de couleur noir utilisé pour favoriser le dégivrage [17].

D'autres types de revêtements, permettant de réduire les forces de cisaillement entre la glace et la surface de la pale recouvrent les pales de certaines éoliennes [3].

1.5.2 Le dégivrage par micro-ondes

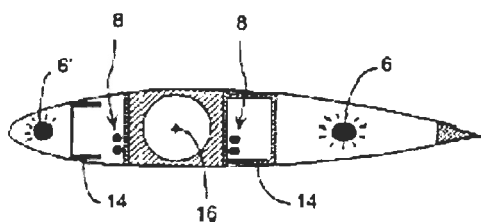
La solution des micro-ondes a été étudiée en laboratoire par la société danoise LM Glasfiber qui a déposé un brevet à ce sujet ([10] et [18]). L'idée de ce système est de chauffer par micro-ondes le matériau qui constitue la pale afin de prévenir la formation de glace. Le système antigivre est activé lorsque certaines conditions sont réunies : forte humidité ou teneur en eau liquide, température inférieure à 0°C et, à défaut, pour faire fondre la glace éventuellement accumulée à la surface. L'objectif est de maintenir la surface de la pale à une température légèrement supérieure à 0°C pour économiser au maximum l'énergie de dégivrage. L'installation générale du système sur l'éolienne est présentée Figure 1-8.



- 2 Pales
- 4,6 Matériel de chauffage des pales
- 10 Équipements de mesure
- 6'' Matériel de chauffage des éléments de mesure

Figure 1-8. Système global de chauffage par micro-ondes [18].

Version a.



- 6 et 6' générateurs de micro-ondes
- 8 câbles d'alimentation
- 14 poutres principales longitudinales
- 12 coque de protection aérodynamique
- 16 axe neutre de la pale

Version b.

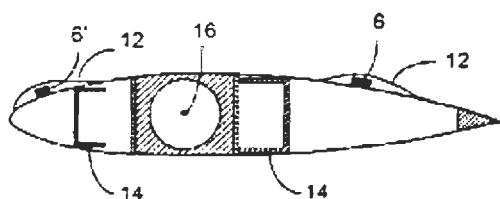


Figure 1-9. Principe de chauffage par micro-ondes de LM Glasfiber [18].

Les générateurs de micro ondes sont ceux utilisés dans la fabrication des fours micro ondes ménagers : leur puissance est relativement faible mais ils sont très bon marché car produits en grande série, il est donc plus économique d'avoir plusieurs générateurs par pale qu'un seul réalisé sur mesure pour cette application. Ils peuvent être placés à plusieurs endroits sur la pale (voir Figure 1-9). De plus, l'énergie est mieux répartie et les générateurs peuvent éventuellement être activés séparément afin de mieux répondre aux besoins.

La puissance nécessaire à l'alimentation d'un tel système est trois fois plus faible (par pale) que celle nécessaire pour un système par élément chauffant [10]. L'installation du système est facile et ne nécessite pas de grosses modifications de la structure de la pale. Il n'y a pas de problème de foudre (contrairement aux systèmes électriques) et la maintenance est simple.

Il est conseillé de recouvrir la surface de la pale avec un matériau reflétant les micro-ondes (matériau métallique, grillage type cage à poule par exemple) recouvert à son tour par une peinture pour améliorer l'état de surface final de la pale. En effet, les micro-ondes ont une bonne pénétration dans les matériaux composites et peuvent être reflétées à travers la pale grâce au matériau ajouté, on améliore ainsi le dégivrage sans augmenter la consommation énergétique du système.

Les câbles d'alimentation des générateurs micro-ondes sont placés de préférence à proximité de l'axe neutre de la pale afin de diminuer les ruptures de câble par rotation sur eux-mêmes. Ces câbles font également partie du système para foudre.

LM-Glasfiber a testé le prototype de ce système sur sa pale LM 19.1 avec une puissance de 6 kW et une fréquence d'émission de 2.45 GHz. La puissance émise est inférieure à 0.01 W/m².

Il est possible, afin de limiter la présence de câbles dans la pale, de placer les générateurs micro-ondes à la base de la pale et d'utiliser des conducteurs d'ondes pour la distribution de l'énergie jusqu'au bout de la pale (voir Figure 1-10).

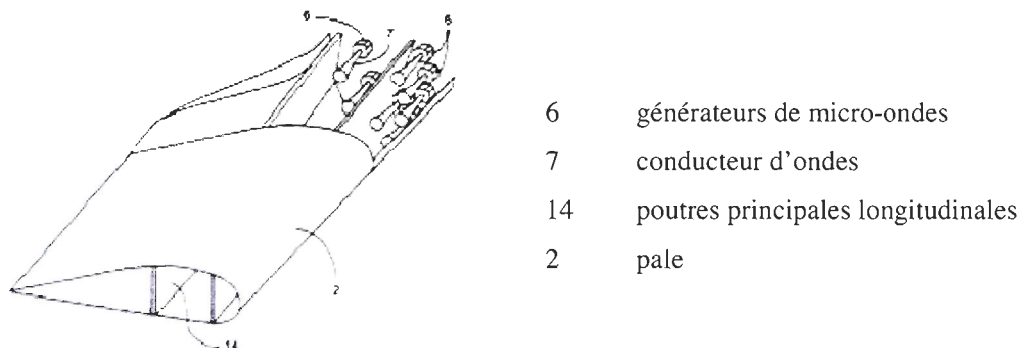


Figure 1-10. Système avec générateurs micro ondes à la base de la pale [18].

Une autre version du système de dégivrage par micro ondes est présentée sur la Figure 1-11. L'équipement micro ondes est fixé sur des glissières sur la tour. En fonctionnement normal, les pales passent devant les générateurs micro-ondes en tournant et sont chauffées lors de leur passage. En minimisant la distance des générateurs aux pales, le chauffage peut être réalisé en consommant un minimum d'énergie. En connectant le système d'orientation du rotor aux bagues entourant la tour, les générateurs peuvent se déplacer et suivre les déplacements du rotor.

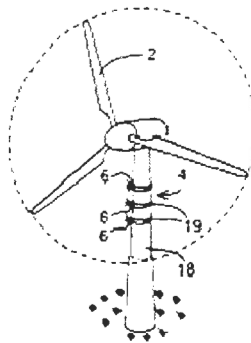


Figure 1-11. Système de dégivrage installé sur la tour [18].

1.5.3 Le dégivrage pneumatique

Le dégivrage pneumatique est une technique couramment utilisée en aéronautique pour les petits avions. Plusieurs sociétés telles que AERAZUR du groupe ZODIAC et B/E Aerospace ont développé et commercialisé ce type de système, généralement sous forme de tapis à installer sur les zones à dégivrer ([19] et [20]). Le principe de fonctionnement est basé sur des chambres à air qui se gonflent et se dégonflent par impulsion d'air comprimé. Le gonflement cyclique de ces chambres a pour effet de briser et d'éjecter la glace. On peut voir la composition du système utilisé par AERAZUR sur la Figure 1-12 à gauche. La société GOODRICH étudie ce système pour l'adapter aux conditions particulières des éoliennes (Figure 1-12 à droite).

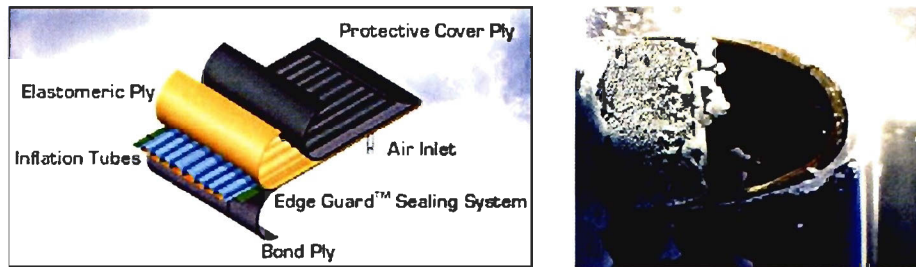


Figure 1-12. Système de dégivrage pneumatique utilisé en aéronautique.

Le dégivreur est constitué de plusieurs couches d'élastomère et de tissu. La couche supérieure est un élastomère résistant à l'eau, choisi pour sa résistance à l'érosion et au vieillissement. Juste en dessous de cette couche se trouve une couche de caoutchouc naturel dont la résilience aide à expulser l'air après le gonflement des tubes.

Cette technique est utilisée sur de nombreux avions (voir Figure 1-13) et a été appliquée sur certaines éoliennes, mais le système en lui-même, bien que très économique du point de vue énergétique, modifie les propriétés de la pale et est difficile à installer.



Figure 1-13. Avions ZODIAC équipés de dégivreurs pneumatiques.

Le principal inconvénient de ce système est l'éjection des morceaux de glace, qui peuvent venir heurter d'autres composantes de l'éolienne (autre pale, nacelle, tour) et présentent un danger pour l'entourage de l'éolienne (humain, animal et matériel). De plus, en raison de la force centrifuge importante en bout de pale, un tel système va se gonfler naturellement et il faudra donc le diviser en plusieurs sections pour réduire ce phénomène gênant. Le gonflage des chambres à air modifie ponctuellement les propriétés aérodynamiques de la pale et représente ainsi une source de pollution sonore. Enfin, au cours des 20 années de vie de l'éolienne, un tel système requerra une maintenance importante qui pourrait s'avérer très coûteuse [3].

1.5.4 L'électro-expulsion

Au Québec, la société Hydro Québec utilise le déglacage électro-expulsif pour ses conducteurs, câbles de garde, haubans, etc. Ce système est efficace, peu énergivore et facilement automatisé. Il utilise les impulsions électromagnétiques pour éjecter la glace. Cette méthode est sans dommage pour l'environnement et ne perturbe pas les transmissions hertziennes dans les bandes de télécommunications. La société GOODRICH développe actuellement ce système pour l'aéronautique dans ses laboratoires. Une bobine en spirale est placée à proximité de la face interne du profil. Lorsqu'un courant est appliqué sur la bobine, un champ magnétique est créé entre la bobine et l'épaisseur du profil. Il en résulte un déplacement rapide de la surface du profil et l'expulsion de la glace accumulée comme on peut le voir sur la Figure 1-14 avec de la glace colorée.



Figure 1-14. Essai du système de déglacage par Hydro-Québec.

1.5.5 Le chauffage par air chaud

Le chauffage par air chaud utilise un système électrique propulsant de l'air chaud dans la pale. Une circulation est créée par séparation en deux parties du volume intérieur de la pale, l'air chaud est injecté dans une partie, expulsant l'air froid qui est ainsi dirigé vers le système de chauffage. Un inconvénient majeur est la nécessité d'avoir un appareil par pale. Ce système, commercialisé par la société ENERCON (Figure 1-15), est pratique car il procure un chauffage homogène de toute la pale, mais son efficacité est insuffisante lorsque les conditions deviennent sévères et diminue avec l'augmentation du rayon; ainsi pour des pales longues, on observe la présence de givre en bout de pale [21]. De plus, dans des conditions de givrage sévère, le chauffage de la surface extérieure de la pale reste essentiel si l'on veut obtenir de bons résultats [8].

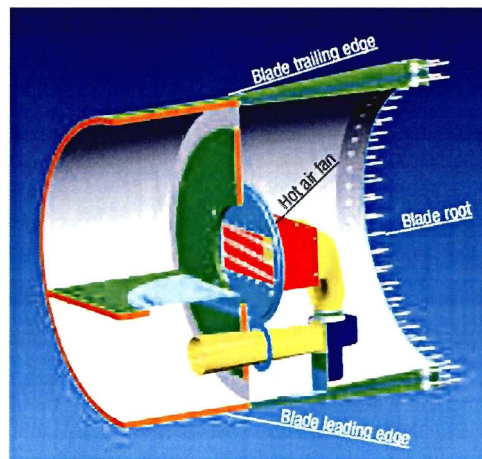


Figure 1-15. Système de chauffage par air chaud développé par ENERCON.

1.5.6 Le dégivrage électrothermique

Les deux seuls dispositifs de dégivrage ayant été commercialisés à l'heure actuelle, sont de type thermique (électrothermique) [14]. Le but de ces techniques n'est pas de faire fondre tout le givre accumulé sur la pale, cette solution consommerait beaucoup trop d'énergie, mais partant du constat que l'adhésion de la glace diminue avec l'augmentation de la température, il s'agit de faire augmenter la température à la surface de la pale pour amener la glace à s'auto évacuer sous l'effet des forces centrifuges de l'éolienne et grâce à un film d'eau qui se crée entre la glace et la surface

de la pale. La température à atteindre est pour la plupart des matériaux proche du point de liquéfaction de la glace (0°C), mais ce n'est pas toujours le cas ([22] et [23]).

L'insertion d'éléments chauffants (résistifs) dans ou à la surface de la pale est le système le plus couramment utilisé actuellement car il présente peu d'inconvénients et est adaptable aux pales déjà fabriquées. Sur les systèmes existants, l'élément chauffant est situé sur le bord d'attaque de la pale car c'est là que l'accrétion de glace débute en général. Il se prolonge en général sur l'intrados (en raison de l'angle d'incidence du profil qui crée une plus forte accumulation de glace sur l'intrados que sur l'extrados) [23]. Le système est contrôlé par un détecteur de givre et un capteur de température à la surface de la pale.

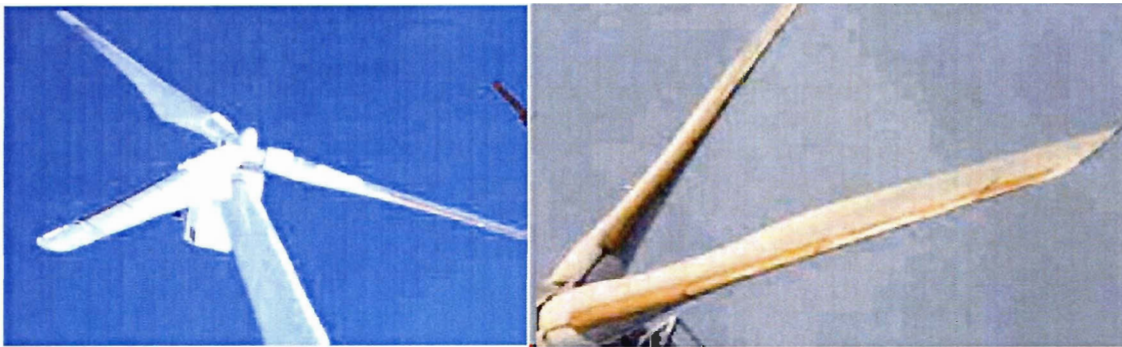


Figure 1-16. Éléments chauffants sur le bord d'attaque des pales

La température à la surface de la pale, dans le cas de ce type de dégivrage, est indépendante de la taille de la pale et de l'épaisseur du matériau qui la constitue [14]. La conception de l'élément chauffant dépend quant à elle de la géométrie de la pale. Sa puissance sera optimisée en considérant les éventuels relevés de température extérieure, d'humidité de l'air et de mesure de vitesse de rotation du rotor [17]. En revanche, moins il y a d'accumulation de glace sur la pale, plus le temps de chauffage est long afin d'élever la température de surface de la pale. Ceci est dû aux propriétés isolantes de la glace, qui crée une barrière thermique entre la pale et le milieu extérieur et réduit ainsi les échanges convectifs avec l'air ambiant [23].

La température à laquelle doit être maintenue la surface de la pale est un élément capital pour optimiser la puissance consommée par le système de dégivrage. Si la pale peut être maintenue à -5°C dans de bonnes conditions (quantité de givre sur la pale acceptable et bon niveau de sécurité), une diminution de 33 % de la puissance requise par le système de dégivrage peut être obtenue par

rapport à un système qui maintiendrait la pale à 0°C . Dans le cas des éoliennes installées au Yukon, 2,3 % de la production hivernale sont ainsi économisés [22]. De plus, l'identification sur la pale des zones habituellement soumises au givrage permet d'optimiser la position des éléments chauffants. Enfin, il est certain qu'un système de dégivrage consomme moins d'énergie qu'un système antigivre qui doit être en fonction en permanence lorsqu'un risque de givrage existe. Certaines études suggèrent de démarrer le dégivrage après un certain délai d'accumulation de glace. En effet, durant l'accumulation de glace, l'éolienne produit moins, mais une certaine masse de glace accumulée permet une meilleure évacuation, suite à la mise en marche du système de dégivrage, sous l'effet de la force centrifuge et des vibrations [22]. Un problème de sécurité, du aux éventuels morceaux de glace éjectés, se pose alors et la performance des appareils de détection du givre est essentielle dans ces conditions.

Dans certaines conditions de givrage sévère, la puissance des systèmes de dégivrage installés s'est révélée trop faible. De plus, un des principaux problèmes de ce système est sa consommation d'énergie. Pour réduire cette consommation énergétique, les éléments chauffants sont généralement appliqués sur le bord d'attaque de la pale uniquement. Dans certains cas, l'eau, évacuée le long de la pale au cours du chauffage en condition de givre, regèle une fois qu'elle a quitté la zone chauffée (Figure 1-17), causant de grosses modifications du profil et donc des pertes énergétiques importantes [8].

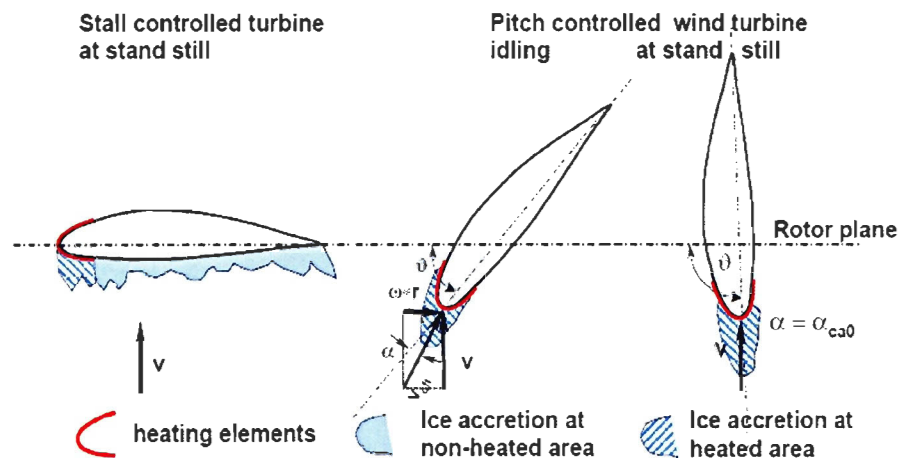


Figure 1-17. Eolienne munie d'éléments chauffants sur le bord d'attaque [3].

Par ailleurs, les éléments chauffants doivent être conçus pour résister aux contraintes auxquelles ils sont soumis en fonctionnement, comme on le voit sur la Figure 1-18. Sur le bord d'attaque, les charges agissant sur la structure de la pale doivent être prises en compte lors de la conception. Les forces aérodynamiques et les vibrations latérales créées par les fréquences naturelles de vibration des pales, peu amorties dans ces directions (latérale et longitudinale), s'ajoutent aux effets de la rotation des pales dans le champ de gravité terrestre et induisent des tensions importantes dans les fibres du matériau constituant la pale. Ces tensions sont transmises aux fils et fibres des éléments chauffants, surtout s'ils sont constitués de fibre de carbone. Leur module de Young est plus élevé que celui de la fibre de verre qui compose les pales actuelles, les fibres des éléments chauffants subiront donc des contraintes plus élevées. Des solutions techniques particulières doivent être étudiées pour éviter la formation de fissures dans les éléments chauffants [3].

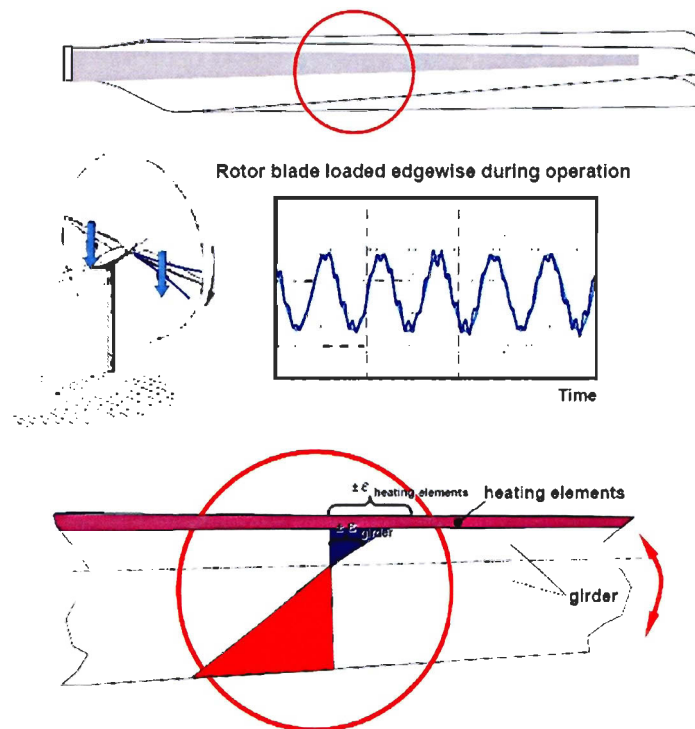


Figure 1-18. Contraintes appliquées aux éléments chauffants sur la pale en rotation [3].

En Finlande, à Olostunturi, des mesures réalisées en 2000 ont montré que le système de chauffage avait consommé 3,6 % de la production énergétique annuelle de l'éolienne. Cette valeur aurait pu être réduite avec des détecteurs de givre plus performants car les conditions réelles nécessitaient moins de puissance que celle utilisée [8]. A Pori, également en Finlande, l'installation de systèmes

de dégivrage des pales a été motivée principalement par la sécurité du public. La consommation de puissance du système de dégivrage était de 1 % de la production énergétique annuelle (moyenne des mesures réalisées entre 1999 et 2001). La puissance maximale utilisée par ce système était de 6 % de la puissance nominale de l'éolienne [8]. Le système de dégivrage développé et commercialisé par Kemijoki Arctic Technology Oy et VTT Technical Research Centre of Finland nécessite 15 kW par pale pour une éolienne de 600 kW et sa consommation est estimée entre 1 et 4 % de la production annuelle de l'éolienne. Ces valeurs sont très encourageantes lorsqu'on tient compte du fait que le givre, même léger, peut réduire la production d'une éolienne de 15 à 30 % selon les sources ([24] et [14]). De plus, l'identification des zones habituellement recouvertes par du givre sur la pale permettra d'optimiser la position des éléments chauffants. Le rapport de Yukon Energy Corporation [17], indique que le système de dégivrage électrothermique utilisé, consomme en moyenne 1700 W alors que la production annuelle estimée de l'éolienne est de 300 000 kWh. Le système de dégivrage consomme dans ce cas 5 % de l'énergie produite par l'éolienne.

1.5.7 Comparaison et évolution des systèmes de dégivrage

Le tableau suivant permet une comparaison des systèmes présentés en détails aux paragraphes précédents. On peut y observer rapidement les avantages et inconvénients de chacun, tout en notant que la moitié d'entre eux n'ont jamais été utilisés sur site jusqu'à présent.

Tableau 1-1. Comparaison des systèmes

		micro-ondes	pneumatique	air chaud	éléments chauffants	revêtement	électro-expulsion
Exploitation sur sites				X	X	X	
Niveau de développement atteint	Essais en laboratoire	X	X	X	Projet	X	
	Essais sur pales			X	X	X	
Problème d'expulsion de morceaux de glace			X				X
Problème de consommation d'énergie				X	X		

Le principal inconvénient des systèmes actuellement exploités est leur consommation d'énergie, qui réduit par conséquent le rendement des éoliennes en période de dégivrage. Les systèmes actuellement en développement, en particulier le système à micro ondes ou le système électro expulsif, ne présentent pas cet inconvénient et offrent donc une alternative très intéressante.

Sachant que les systèmes pneumatiques et électriques nécessitent une certaine couche de glace pour être efficaces, l'expulsion de morceaux de glace est un inconvénient majeur de ces systèmes car la sécurité est une préoccupation majeure des exploitants d'éoliennes. La situation géographique des éoliennes peut imposer des conditions de sécurité drastiques (stations de ski, pâturages, proximité de routes ou plus globalement d'infrastructures) et présenter un frein à l'installation des systèmes pour lesquels l'expulsion de glace est inévitable.

L'étude en laboratoire et l'analyse à échelle réduite des systèmes de dégivrage est un passage obligé pour les entreprises qui se lancent dans le développement de tels systèmes. La plupart des études en sont d'ailleurs à ce stade car l'installation de systèmes de dégivrage et l'instrumentation d'une éolienne sont des opérations très coûteuses et supposent d'avoir un système déjà performant.

Les systèmes actuellement en développement sont très prometteurs. L'avantage principal recherché est l'économie d'énergie, et les systèmes pneumatiques, micro-ondes et électro-expulsifs sont de ce point de vue très intéressants. La modularité des systèmes est un élément de la recherche qui sera très certainement développé dans le futur car il permet de dégivrer plus efficacement la pale par une utilisation optimale de l'énergie injectée.

Les éoliennes actuellement exploitées en climat froid sont pour la plupart des éoliennes conçues pour des climats tempérés qui ont été adaptées en fonction des besoins et au fur et à mesure de l'apparition des problèmes. Les systèmes utilisés sont donc des systèmes facilement adaptables sur les pales existantes. Mais l'avenir devrait voir apparaître des pales spécialement conçues pour l'exploitation en climat froid, parfaitement adaptées et optimisées pour cette fonction.

Les systèmes de dégivrage des pales d'éoliennes sont nombreux et basés sur des principes de fonctionnement divers. Leur développement est en cours et la recherche est actuellement active dans le domaine du givrage des éoliennes et des pales plus particulièrement. Les prochaines années

devraient voir apparaître la commercialisation de nombreux systèmes performants et consommant peu d'énergie. L'exploitation des éoliennes en climat nordique devrait alors se faire dans de meilleures conditions. L'observation des sites nordiques actuellement en fonctionnement permettra également de mieux comprendre les effets du froid et du givre pour mieux concevoir les pales et les éoliennes appelées à opérer en climat nordique. On commence déjà, et cette tendance devrait s'accroître, à voir apparaître sur le marché des éoliennes spécialement conçues pour une utilisation en climat nordique de la tour aux pales, en passant par la génératrice. Par exemple, l'éolienne E-40 de Enercon, la NW100/19 de Northern Power (opère de -46°C à 50°C), la Bonus 150 kW Mark III (peut opérer jusqu'à -30°C) et la Vestas V47 660 kW (opère également jusqu'à -30°C) ont toutes été conçues pour respecter les contraintes techniques des climats froids.

1.6 Résultats aérodynamiques de la littérature sur les profils givrés

L'un des principaux inconvénients de l'accumulation de glace sur les pales est la détérioration des propriétés aérodynamiques de la pale. Cette section discute de ce point et donne les résultats de différentes études à ce sujet.

1.6.1 Impact des formes de glace lors du givrage

L'étude expérimentale de l'impact du givrage sur les propriétés aérodynamiques de la pale a été commencée il y a trois ans en collaboration entre le laboratoire de Recherches en Énergie Éolienne de l'UQAR et la Laboratoire International des Matériaux Antigivre de l'UQAC. Les masses et formes de glace accumulées durant les essais expérimentaux (Chapitre 3) sont comparées avec celles précédemment obtenues par Hochart [25]. La portance et la trainée de référence sont celles du Risø National Laboratory [26].

Il a été démontré que le givre diminue la portance et augmente la trainée du profil, mais ces variations doivent être quantifiées. Il est très difficile d'obtenir une estimation de la portance et de la trainée par simulation numérique en raison des larges zones de séparation créées par le givre. Expérimentalement, Hochart a mesuré à l'aide d'une balance aérodynamique la portance et la trainée d'un profil givré en régime sec. Ses conditions expérimentales étaient une température de -1.4°C , une teneur en eau liquide de 0.218 g/m^3 et une vitesse de vent de 8.8 m/s . Les vitesses dans

la soufflerie sont de 19.9 m/s, 38 m/s et 56 m/s. Elles correspondent, selon une première estimation, aux trois positions radiales référencées sur la Figure 1-19. L'altération des propriétés aérodynamiques est très visible en bout de pale, compte-tenu de l'augmentation de la vitesse de rotation et de la sévérité du givrage.

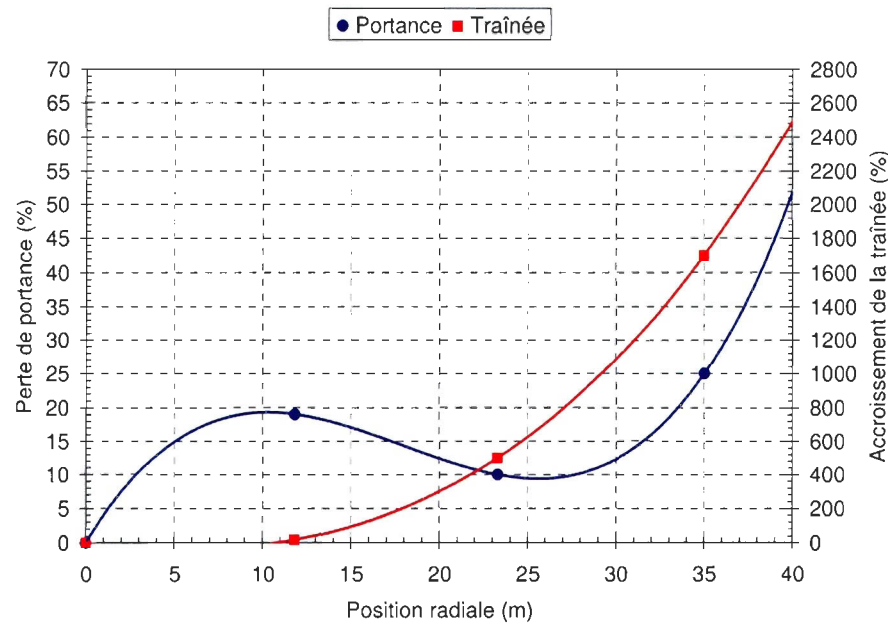


Figure 1-19. Pertes de portance et accroissement de la traînée en régime sec [25].

Seifert [9] expliquait déjà en 1992, d'après une étude expérimentale en soufflerie, que la portance est beaucoup moins perturbée que la traînée par le givre. La traînée subit une augmentation dramatique sous l'effet de la glace accumulée. De même, le moment de torsion du profil est accru en raison de la distance entre le point d'attache et le centre aérodynamique du profil qui augmente.

Le projet WECO (Wind Energy Research in Cold climates [11]) s'est intéressé aux propriétés aérodynamiques des profils de pales givrés. Pour ce faire, les méthodes suivantes ont été utilisées :

- ✓ observations (vidéos, questionnaires, photos, collecte de morceaux de glace)
- ✓ expérimentation en soufflerie (stationnaire et instationnaire) avec des moulages en plastique de fragments de glace réels
- ✓ modèles numériques deux dimensions du givrage (TURBICE)
- ✓ expérimentation en soufflerie à faible température et sous conditions de givrage.

Des profils de pale dont le bord d'attaque a été recouvert de glace (longueur de glace de 2.5 à 44 % de la longueur de corde) ont été testés en soufflerie. Les fragments de glace utilisés provenaient d'éoliennes fonctionnant en climat froid. Des données en deux dimensions de coefficients de portance, trainée et moment ont été obtenues dans une soufflerie en boucle ouverte pour des angles d'attaque de -10 à 30° (profil en mouvement et fixe). Les résultats de ces études sont donnés dans plusieurs articles ([27] et [28]) et font partie du projet WECO.

La Figure 1-20 présente les résultats de Seifert et Richert [27]. Les courbes sont tracées à partir de résultats expérimentaux. Lors des essais, le nombre de Reynolds est de $Re = 630\,000$ et le profil NACA 4415 utilisé avait une corde de $c = 225\text{ mm}$ et une largeur de $l = 500\text{ mm}$ [27]. L'impact des différentes formes de glace peut être comparé avec les courbes du profil propre et montre bien que la rugosité et la dimension de l'accumulation de glace ont un effet significatif sur les propriétés aérodynamiques du profil. Il y a une différence notable entre les formes B et C, respectivement avec un ratio d'accumulation de glace de 22 et 44 % (longueur de glace sur corde).

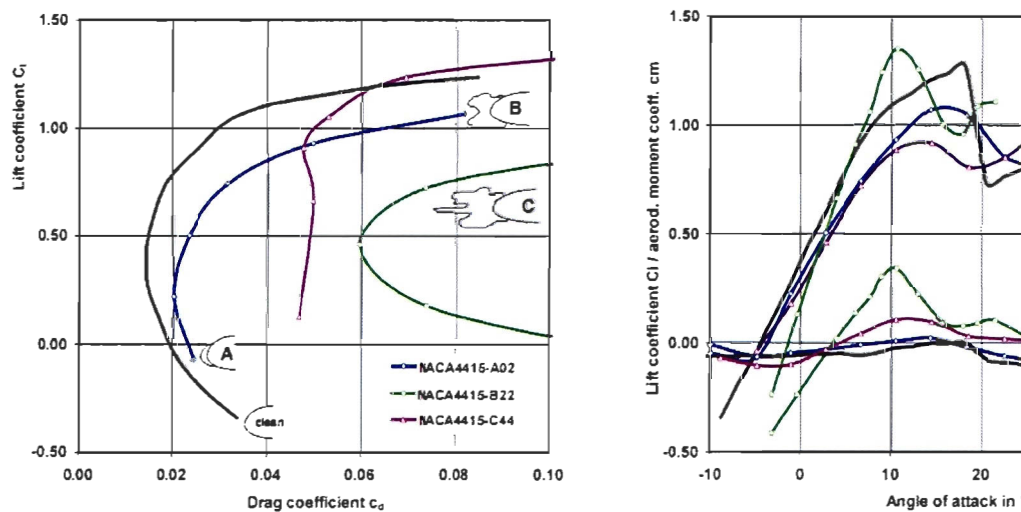


Figure 1-20. Propriétés aérodynamiques d'un profil NACA 4415 (différentes formes de givre).

La forme de l'accrétion de glace entre également en jeu. Lorsque la forme de glace devient trop complexe, il est difficile de prévoir l'évolution des portances et trainées. Cependant cette figure montre bien que globalement les performances aérodynamiques sont diminuées et que cette diminution augmente avec l'importance de la glace accumulée.

Seifert et Richert [27] proposent une méthode pour transposer ces résultats à d'autres profils. Ainsi, les résultats de cette étude sont donnés pour le profil NACA 63-415 à la Figure 1-21. La baisse de portance pour des angles d'attaques compris entre 5 et 25 ° est flagrante et globalement une augmentation de l'accumulation de glace diminue drastiquement les propriétés aérodynamiques du profil.

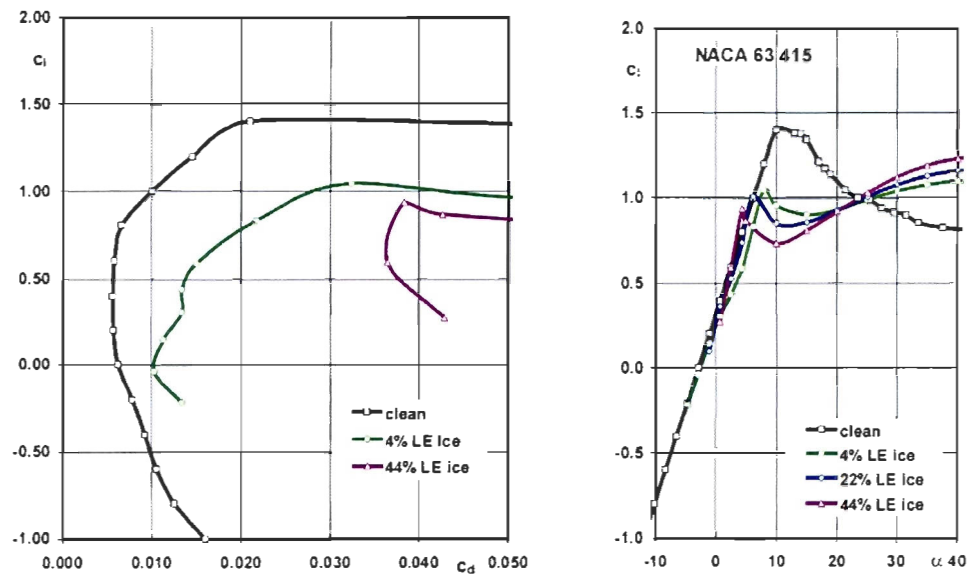


Figure 1-21. Résultats du NACA 4415 transposés au NACA 63-415.

Le Finnish Meteorological Institute a étudié l'impact aérodynamique de la rugosité et du givrage sur le bord d'attaque d'un profil NACA 63 415. Les résultats sont présentés à la Figure 1-22. La perte de portance est très importante entre 8 et 20° d'angle d'attaque alors que la trainée augmente progressivement à partir de 20°. Les résultats de portance, entre 5 et 20 ° d'angle d'attaque appuient ceux de Seifert et les courbes ont la même allure générale.

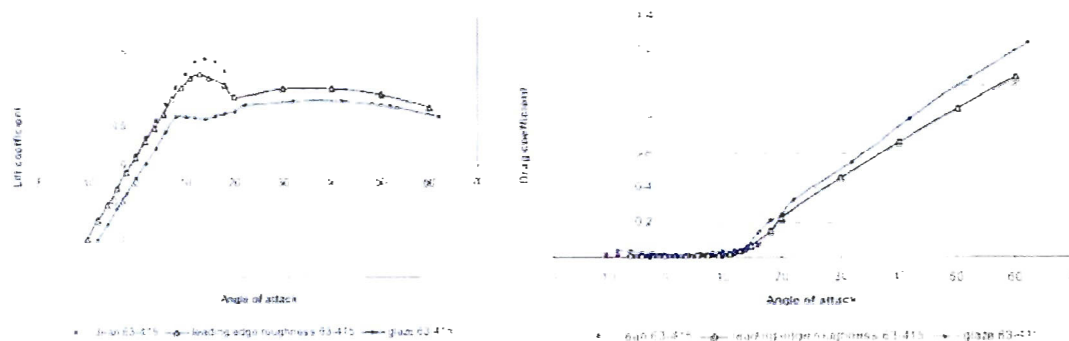


Figure 1-22. Résultats aérodynamiques sur le givrage du profil NACA 63 415.

1.6.2 Étude du Risø sur l'impact de la rugosité de surface

Les résultats du Risø servent de référence et sont intéressants dans la mesure où ils démontrent la sensibilité du profil NACA 63 415 aux rugosités et proposent une modification du profil (NACA 63415-Risø-D) qui permet de le rendre moins sensible à ces rugosités [26].

Le Risø compare les coefficients de portance et de trainée du profil lorsqu'il est lisse et lorsqu'il a été recouvert de différents éléments rugueux (voir Figure 1-23).

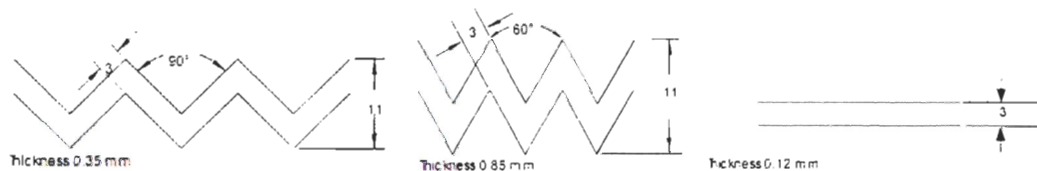
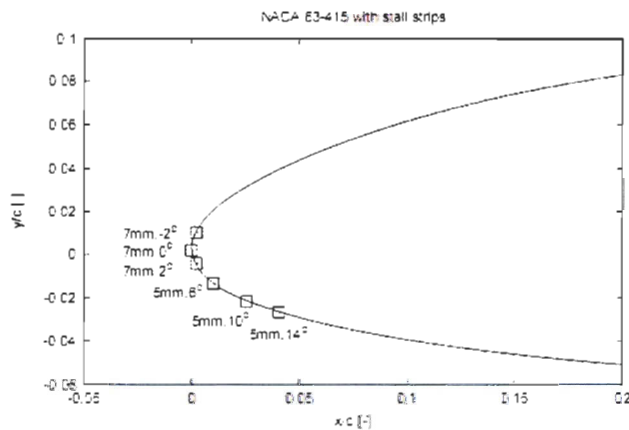


Figure 1-23. Types de collants antidérapants utilisés par le Risø.

De gauche à droite, la Figure 1-23 présente les collants antidérapants avec zigzag à 90 ° (ZZ90°), celui à 60 ° (ZZ60°) et celui sans zigzag. La Figure 1-24 montre les rugosités qui ont été appliquées artificiellement sur le bord d'attaque du profil.



Cales utilisées lors des essais :

(Stall Strips)

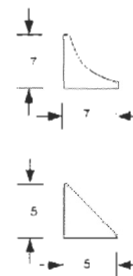


Figure 1-24. Profil avec rugosités.

A titre d'exemple, la Figure 1-25 présente les résultats pour le profil propre (Smooth) et avec l'application de collant ZZ90° à différentes positions sur le profil (0.05/0.10 correspond à une rugosité sur le nez du profil, s.s. correspond à une rugosité sur l'extrados et p.s. à une rugosité sur l'intrados). La diminution de la portance est visible à partir de 8 ° d'angle d'attaque.

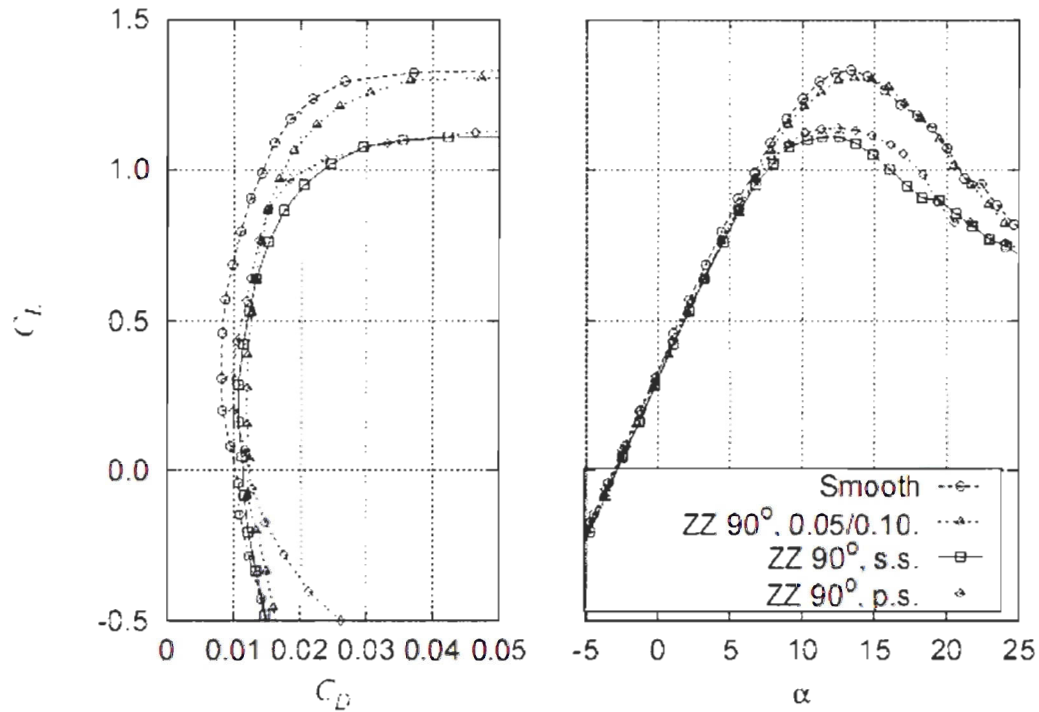


Figure 1-25. Coefficients de portance et de trainée (ZZ90° à différentes positions sur le bord d'attaque).

À partir de 5° d'angle d'attaque, le coefficient de portance calculé est plus élevé que celui qui est mesuré. Ceci est dû au modèle de turbulence dans le code CFD (Computational Fluid Dynamics). Les mêmes problèmes apparaissent plus loin dans les résultats de C_L et C_D des profils givrés en raison des fluctuations dans l'écoulement.

La rugosité sur le bord d'attaque affecte significativement l'écoulement à partir de $\alpha = 8^\circ$ réduisant ainsi la valeur du C_L . Toujours sur le bord d'attaque, la rugosité qui s'étend vers l'extrados diminue davantage le C_L et augmente davantage le C_D que celle qui s'étend vers l'intrados. Par ailleurs, plus la rugosité est importante, plus le C_L diminue et le C_D augmente.

1.6.3 Impact du dégivrage

Le bord d'attaque est la zone la plus sensible du profil aux modifications de forme. Le dégivrage réalisé ici permet de conserver le bord d'attaque globalement bien dégivré. En supposant que

l'amélioration des propriétés aérodynamiques n'est pas seulement proportionnelle à la quantité de givre évacuée mais également relatif à sa localisation [14], le dégivrage du bord d'attaque devrait permettre d'améliorer significativement les performances de l'éolienne.

Des simulations faites avec FLUENT devraient permettre de quantifier le gain de portance et la perte de trainée selon le profil de givre obtenu (voir Paragraphe « Travaux Futurs »). Cependant, comme stipulé dans la section 4.3.1, l'importance des turbulences générées par le givre rendent extrêmement difficiles les simulations numériques et la caractérisation des effets du givre.

1.7 Objectifs et méthodologie

Les systèmes électriques de chauffage sont les systèmes les plus employés à l'heure actuelle pour le dégivrage des pales. Beaucoup d'études et d'expérimentations ont été menées sur ces systèmes et la documentation à leur sujet est abondante. Par un contrôle approprié du chauffage, la littérature laisse supposer qu'il est possible d'arriver à concevoir un système de dégivrage des pales par élément chauffant qui soit à la fois efficace et rentable [14].

1.7.1 Objectifs

Selon les conditions climatiques (taux d'humidité de l'air, température, luminosité, type de précipitations) et la durée de l'évènement, la nature du givre varie, de même que l'épaisseur et la répartition du dépôt. Le système de dégivrage doit pouvoir être pleinement efficace dans un maximum de situations, mais surtout consommer le moins d'énergie possible. C'est là toute la difficulté car le principal défaut d'un système par élément chauffant est sa consommation énergétique. Recouvrir la totalité de la pale d'éléments chauffants résoudrait le problème de performance du système, mais la consommation énergétique serait tellement importante qu'il serait dans la plupart des cas plus économique d'arrêter l'éolienne. Un compromis entre la rentabilité et l'efficacité doit être trouvé.

L'objectif principal est de parvenir à optimiser le système de chauffage par une étude expérimentale en soufflerie, en fonction des conditions climatiques et du type de dépôt de givre sur la pale. Le but est, à terme, de démontrer la pertinence du chauffage des pales afin d'optimiser la production

d'énergie, de diminuer les risques causés par l'éolienne à son environnement et de supprimer totalement les arrêts de fonctionnement dus au givre.

L'aboutissement du projet dépend de plusieurs objectifs secondaires décrits ci-après :

1. La conception d'un montage expérimental adapté à la soufflerie réfrigérée utilisée.
2. L'identification de l'influence de différents paramètres sur les performances du système de dégivrage afin de permettre son optimisation :
 - a. Les conditions de givrage
 - b. Les paramètres de commande du système de chauffage, à savoir le coefficient de transfert thermique et la température cible à la surface de la pale
 - c. L'emplacement et les dimensions des éléments chauffants sur le profil aérodynamique.
3. L'élaboration de règles de similitude pour l'application des conditions de givrage réelles dans la soufflerie.

Les éoliennes ont une durée de vie qui peut atteindre vingt ans. Durant cet intervalle de temps, elles doivent être le plus rentables possible pour minimiser les coûts de l'énergie produite. L'utilisation relativement récente des systèmes de dégivrage des pales ne permet pas d'estimer la durée de vie d'un système tel que celui étudié, mais il est évident que sa présence sera d'autant plus intéressante qu'il sera capable de remplir pleinement sa fonction dans un maximum de situations et pour le plus longtemps possible. Ce qui est possible si son utilisation est optimisée.

1.7.2 Méthodologie

L'atteinte de l'objectif principal passe par l'élaboration d'un dispositif expérimental permettant d'étudier l'influence des différents paramètres sur les performances du système de dégivrage. Une étude théorique du processus et des phénomènes mis en jeu est un préalable essentiel.

Le développement d'un système de dégivrage des pales doit absolument commencer par l'identification des conditions extrêmes de fonctionnement que la technologie, les conditions climatiques et économiques imposent [14]. En effet, la puissance de chauffage nécessaire dépend de la sévérité des conditions météorologiques et de la vitesse de rotation des pales. Dans les zones où

le givre est léger et où le système de dégivrage n'est installé que pour des raisons de sécurité, le besoin sera moindre que dans les zones nordiques, où les pales sont gelées durant des mois entiers.

Les objectifs secondaires seront atteints de la manière suivante :

1. La conception du montage expérimental passe par le respect du cahier des charges qui découle des contraintes du concept de dégivrage retenu et de la soufflerie réfrigérée utilisée pour l'expérimentation.
2. L'influence des paramètres de givrage et de chauffage est déterminée grâce à :
 - a. La simulation de plusieurs conditions de givrage. Elles sont choisies à partir des conditions météorologiques dans lesquelles le système doit opérer. Elles doivent être déterminées de manière à limiter le nombre d'expériences à réaliser pour obtenir de ces expériences un maximum de conclusions, permettant d'améliorer le dégivrage.
 - b. L'élaboration du dispositif et des conditions expérimentales afin de faire varier les paramètres de chauffage. Les contraintes technologiques inhérentes à la taille de la soufflerie, à sa forme et à son mode de fonctionnement sont prises en compte et intégrées dans la conception du prototype. Les matériaux utilisés pour la fabrication du montage doivent être ceux utilisés par les fabricants de pales.
 - c. Le contrôle indépendant de chaque élément chauffant.
3. Les règles de similitude sont déterminées par l'analyse du processus de similitude et son utilisation rigoureuse afin de permettre une interprétation correcte des résultats et leur application en conditions réelles.

1.7.3 Limites du projet

Ce projet se limite à la conception et l'optimisation du système de dégivrage sans aborder la problématique de la détection du givre. On présuppose donc que si le dégivrage est mis en route, c'est que du givre a été identifié par un système de détection.

Le système de dégivrage envisagé ici se veut « modulaire ». En effet, contrairement à un laboratoire où il est possible de fixer des conditions expérimentales, dans la nature, les conditions météorologiques varient constamment. Les régions où sont installées les éoliennes sont toutes différentes et ont chacune des événements de givrage différents, en durée autant qu'en intensité.

Chaque éolienne a donc des besoins différents en matière de dégivrage. De plus, la vitesse de la pale varie entre le moyeu et son extrémité faisant varier l'intensité du givre. Par conséquent, la pale en elle-même a des besoins différents sur sa longueur.

CHAPITRE 2

CONCEPTION DU MONTAGE EXPERIMENTAL

L'étude du système de dégivrage passe par la fabrication d'un montage expérimental modélisant la pale réelle de l'éolienne. Ce montage est utilisé dans la soufflerie réfrigérée sous conditions givrantes. Le présent chapitre décrit les caractéristiques du système réel modélisé, les choix technologiques effectués et leurs fondements théoriques. En particulier, il détaille la conception et la fabrication de la section de pale, le dispositif de dégivrage électrothermique, le contrôle et l'instrumentation du montage.

2.1 La section de pale

2.1.1 La modélisation de l'éolienne

La simulation faite en laboratoire est basée sur des données météorologiques réelles mesurées lors d'évènements de givrage à Murdochville. L'éolienne utilisée pour la modélisation en soufflerie est une Vestas V80 de 1,8MW car soixante éoliennes de ce type sont en service à Murdochville ([29] et [30]). En choisissant ces paramètres de modélisation, le système de dégivrage est conçu à la fois en fonction des caractéristiques météorologiques d'un site et des caractéristiques techniques de l'éolienne sur laquelle il devrait être installé.

Les caractéristiques fournies par le manuel technique de VESTAS pour l'éolienne V80 de 1.8 MW sont présentées au Tableau 2-1.

Tableau 2-1. Caractéristiques de l'éolienne.

Hauteur totale	107 m	Vitesse optimale du vent	8 m/s
Diamètre rotor	80 m	Vitesse de fonctionnement nominal	15 m/s
Surface de capture	5027 m ²	Vitesse de démarrage	4 m/s
Nombre de pales	3	Vitesse de coupure	25 m/s
Longueur de pale soumise au vent	~ 35 m	Vitesse optimale de rotation	16.2 RPM
Poids de la nacelle	63 t	Angle d'attaque correspondant	12 °
Poids du rotor	35 t	Angle de calage initial	7,65 °

Le coefficient de puissance et la courbe de puissance sont présentés à la Figure 2-1 en fonction de la vitesse du vent.

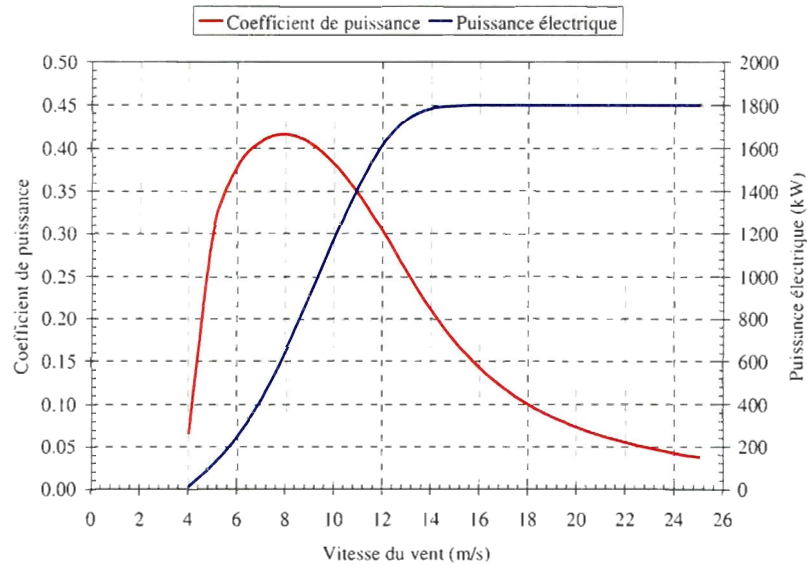


Figure 2-1. Coefficient de puissance et puissance électrique de la Vestas V80 de 1.8 MW.

Le coefficient de puissance est le rapport entre la puissance produite par l'éolienne (657 kW à 8 m/s) et celle disponible dans le vent (1 580 kW à 8 m/s) :

$$c_p = \frac{P_{\text{rotor}}}{P_{\text{vent}}} \quad (3)$$

Pour la Vestas V80, ce coefficient est maximal à 8 m/s et vaut $c_p=0.4159$.

La pale de l'éolienne Vestas V80 est constituée de différents profils aérodynamiques : un FFA W3 XXX entre le moyeu et le centre de la pale et un profil NACA 63 XXX entre le centre et le bout de la pale (voir Figure 2-2).

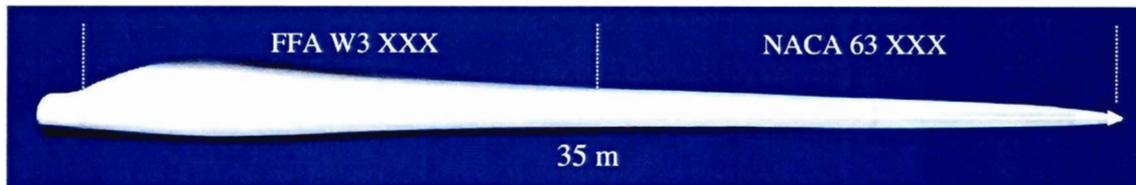


Figure 2-2. Profils aérodynamiques de la pale Vestas V80

Pour l'encastrement de la pale dans le moyeu, une section cylindrique est utilisée. Le passage du profil cylindrique au FFA W3 XXX s'effectue sur les premiers 10% de la pale. Toutes ces données proviennent de la documentation technique de Vestas accessible au public. Les données manquantes doivent être estimées en se basant sur celles disponibles pour d'autres éoliennes, permettant ainsi de faire des choix réalistes.

Pour la conception du montage expérimental, un seul profil aérodynamique est sélectionné. Le choix a été arrêté sur un profil NACA 63 415. C'est un profil couramment utilisé pour les pales d'éoliennes et qui a été étudié par d'autres laboratoires comme le Risø National Laboratory. Ce profil est représenté à la Figure 2-3.

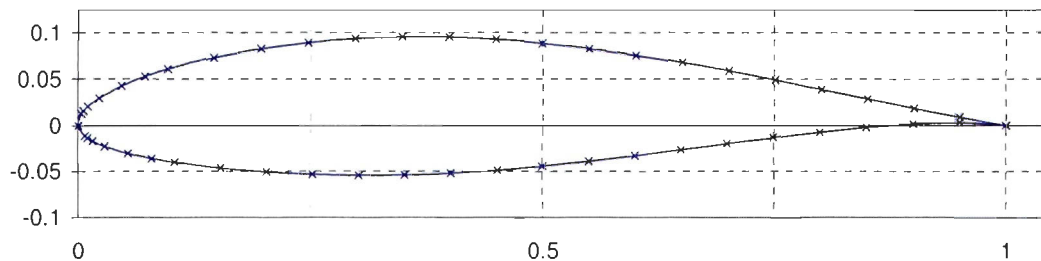


Figure 2-3. Profil NACA 63 415

Afin de représenter correctement les conditions de l'écoulement réel sur le profil en soufflerie, il est nécessaire de faire une analyse cinématique d'une section de pale. Cette analyse doit prendre en compte la vitesse de l'air due à la rotation de la pale ($\omega \cdot r$), la vitesse du vent (U_w) ainsi que la géométrie réelle de la pale.

Comme illustré à la Figure 2-2 la pale est formée d'une succession de profils aérodynamiques entre le pied de la pale et son extrémité. Chaque profil est caractérisé par un angle de vrillage b par rapport à l'axe de la pale. L'angle de vrillage est une donnée intrinsèque à la pale et permet de maximiser la puissance produite à une vitesse particulière. Par ailleurs, la pale tourne autour de son axe avec un angle de calage β qui peut varier en cours de fonctionnement pour le cas des éoliennes à calage variable, comme la Vestas V80.

L'angle entre le profil et le plan de rotation de la pale est appelé angle de pas et noté φ . Il est la somme des angles de calage (pitch) et de vrillage :

$$\varphi = \beta + b \quad (4)$$

Par ailleurs, l'angle φ varie en cours de fonctionnement. L'angle d'attaque α , qui est l'angle entre l'axe du profil et la vitesse relative du vent peut être exprimé comme suit :

$$\alpha = \varphi - \beta = \arctan\left(\frac{U_w}{U_{rot}}\right) - \beta \quad (5)$$

La Figure 2-4 illustre toutes ces données géométriques et cinématiques pour une section de la pale en deux dimensions [31].

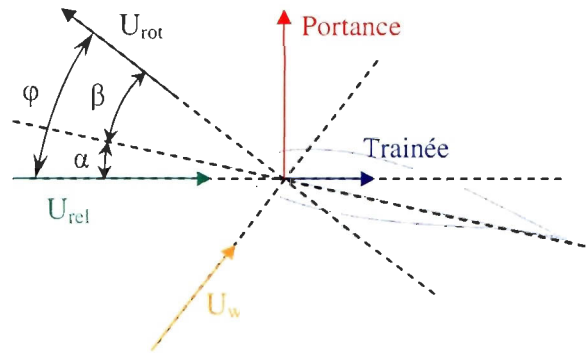


Figure 2-4. Angle de vrillage de la pale.

L'éolienne VESTAS V80 dispose d'un système de contrôle à calage variable des pales nommé OptiTip®. Il s'agit d'un système de contrôle muni d'un microprocesseur et développé par Vestas. Il utilise un cylindre hydraulique de calage indépendant pour chaque pale qui assure une régulation constante et un angle de calage optimal correspondant aux conditions actuelles de vent. L'éolienne est également dotée d'un système de protection contre la foudre.

2.1.2 Fabrication des pales dans l'industrie

Pour fabriquer la section de pale utilisée lors de l'expérimentation, les techniques utilisées dans l'industrie sont étudiées afin d'être le plus proche possible des conditions réelles d'opération du système de dégivrage. Par la suite, la technique de fabrication et la constitution de la section sont déterminées.

La fabrication des pales est sensiblement la même dans l'industrie pour toutes les pales de grande envergure. Les pales sont généralement fabriquées en composite, c'est-à-dire qu'elles sont constituées d'au moins deux matériaux, non miscibles, dont les qualités respectives se complètent pour former un matériau aux caractéristiques mécaniques supérieures. Un composite est généralement anisotrope, constitué d'une ossature appelée renfort, qui transmet les sollicitations mécaniques, et d'une matrice qui assure la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort. La matrice peut être minérale, métallique ou organique. Les résines, telles que la résine polyester utilisée dans la fabrication de la section de pale de ce projet, font partie des matrices organiques.

Le composite utilisé dans la fabrication des pales d'éoliennes est un stratifié fibre de verre / résine polyester. Ce type de matériau est très utilisé car le coût de production est très faible. La matière première est bon marché et les temps d'attente en production sont peu importants. Des renforts en carbone, insérés entre deux couches de fibre de verre, entrent parfois dans la constitution des pales pour augmenter leurs propriétés mécaniques, surtout dans les zones les plus exposées aux contraintes comme le bord d'attaque et de fuite. Un moulage sous vide en deux parties rapportées est en général utilisé. Les installations nécessaires chez les fabricants de pales, comme par exemple NEG Micon (Figure 2-5), Fiberblade Eolica, Bonus (Figure 2-6) sont imposantes, du fait de la taille des pales, et donc de la dimension des moules. Les pales des Vestas V80 situées à Murdochville sont fabriquées par les usines de LM Glasfiber en Gaspésie (Est du Québec).

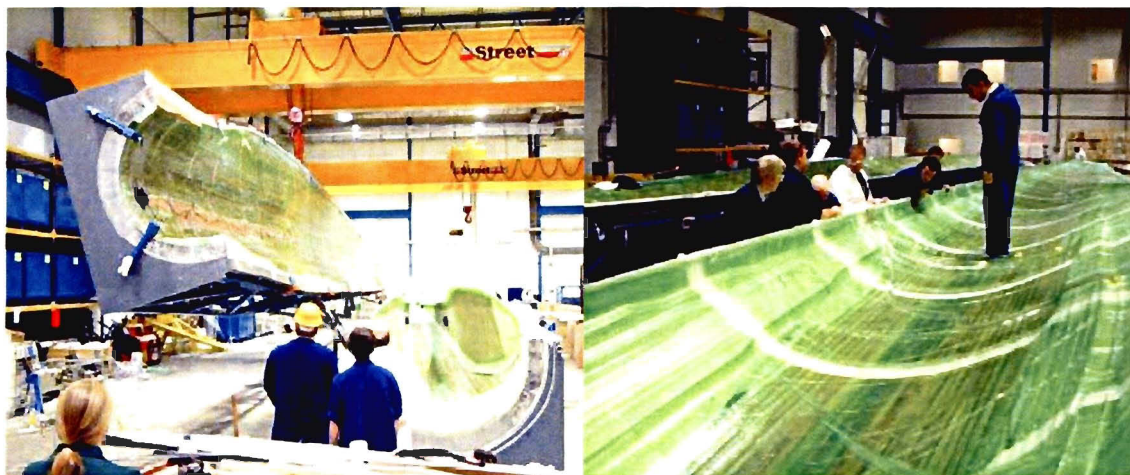


Figure 2-5. Fabrication des pales chez NEG Micon [32].

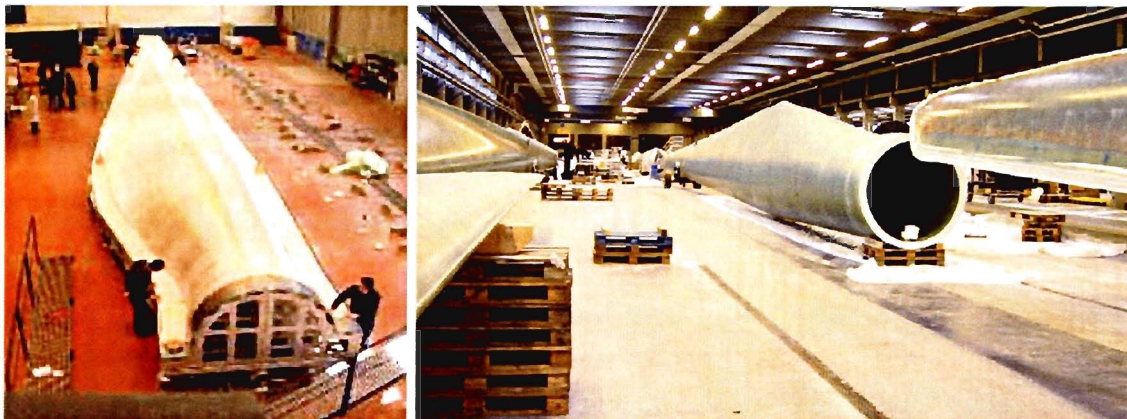


Figure 2-6. Fabrication d'une pale de 40 m chez Fiberblade Eolica (gauche) et chez Bonus (droite).

2.1.3 Fabrication du profil pour le montage expérimental

La fabrication de la section de pale tient compte des restrictions dues aux dimensions de la section d'essai et de la fibre de verre retenue, la même que celle utilisée par les fabricants de pales. Cette section décrit le procédé utilisé pour la fabrication du profil.

Les caractéristiques de la section d'essais de la soufflerie utilisée (voir la section 2.4) imposent des restrictions dimensionnelles au profil (Figure 2-7). La corde du profil, de 0.2 mètres, est limitée par la hauteur de 0.6 mètre de la section d'essai. La largeur du profil est limitée à 0.5 mètres en raison de la largeur de la section d'essais.

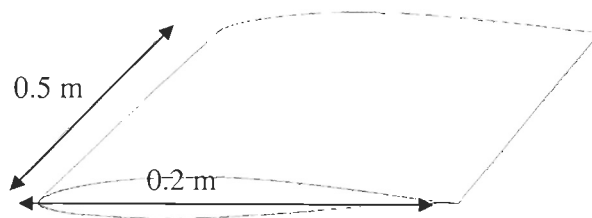


Figure 2-7. Dimensions géométriques de la section de pale.

Les pales en fibre de verre sont composées d'une superposition de couches de fibre de verre sous forme de tissu assemblées entre elles par de la résine polyester. Comme on le voit sur la Figure 2-8, il existe différentes façons de tisser la fibre, qui donnent des tissus aux propriétés mécaniques variées.

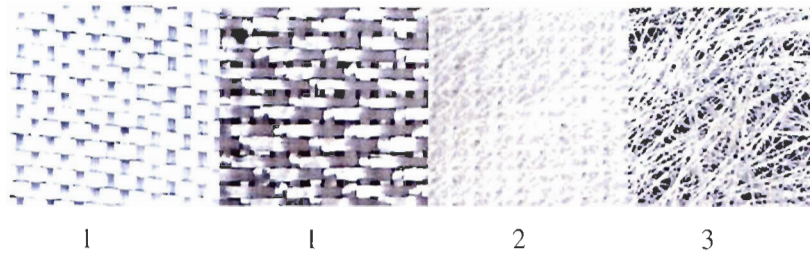


Figure 2-8. Différents tissus de verre. Mat (3), mat/sergé (2) et sergé (1).

Un code standard dans le domaine des composites permet d'identifier l'orientation des fibres dans le solide et ainsi de savoir quel type de tissu a été utilisé (pour connaître précisément le tissu utilisé, il faut également connaître l'épaisseur des couches). Le S indique une symétrie autour du plan médian, l'enchaînement des tissus est alors répété symétriquement.

Les deux tissus utilisés pour la pale sont :

Un tissu $[0]_S$: les fibres sont toutes orientées dans le même sens. Lors de la fabrication, ce tissu est placé de telle sorte que les fibres soient orientées selon la longueur de la pale. Ce tissu est référencé A130 par la société Owens/Corning. Sa masse surfacique est 444 g/m^2 .

Un tissu $[\pm 45]_S$: les fibres sont orientées à $\pm 45^\circ$ par rapport à l'axe de découpe du tissu et par rapport à l'axe de la pale lors de la fabrication. Ce tissu est référencé DB120 par Owens/Corning. Sa masse surfacique est de 393 g/m^2 .

Les fiches techniques de ces matériaux sont données en Annexe A.

D'après les informations disponibles dans la littérature, et principalement dans le rapport du Sandia National Laboratory ([33] et [34]), le profil a été réalisé selon la répartition suivante :

$$[\pm 45^\circ / 0^\circ / \pm 45^\circ]$$

La résine utilisée est une résine ortho-polyester qui pèse environ 1.25 kg/m^3 . La section ainsi fabriquée est creuse pour pouvoir instrumenter le profil, alors que dans la pratique, la pale contient généralement des renforts pour une meilleure résistance mécanique.

L'épaisseur du profil est estimée à 1.3 mm. Cette épaisseur est calculée selon une méthode expérimentale [35]. Le détail du calcul est donné au Tableau 2-2.

Tableau 2-2. Calcul de l'épaisseur du profil.

	Résine polyester	Tissu de fibre de verre
Densité (kg/m ³)	$\rho = 1.25$	$\rho = 2.5$
Constante de calcul	$c_r = \frac{1}{\rho_r} = \frac{1}{1.25} = 0.8$	$c_v = \frac{1}{\rho_v} = \frac{1}{2.5} = 0.4$
Épaisseur (mm)	$e_r = \rho_{surf} * c_r * 0.82$	$e_{verre} = \rho_{surf} * c_v$
	$e_{rA130} = 0.444 * 0.8 * 0.82 = 0.2913$	$e_{vA130} = 0.444 * 0.4 = 0.1776$
	$e_{rDB120} = 0.393 * 0.8 * 0.82 = 0.2578$	$e_{vDB120} = 0.393 * 0.4 = 0.1572$
Épaisseur totale A 130 (mm)	$e_{A130} = 0.469$	
Épaisseur totale DB 120 (mm)	$e_{DB120} = 0.415$	

Pour la résine, un rapport est introduit. Il correspond au ratio de la quantité de résine par rapport à la quantité de fibre de verre dans le produit final. Pour le laminage manuel au contact courant avec du tissu (technique utilisée dans cette étude pour fabriquer le profil) la teneur en fibre de verre est de 55% environs, le rapport est donc de $\frac{100-55}{55} = 0.82$.

L'épaisseur totale du profil est estimée théoriquement à $e = 1.3$ mm. Dans la pratique, une épaisseur moyenne de 1.96 mm a été mesurée. La quantité de résine utilisée est donc légèrement supérieure à la valeur théorique correspondante. Finalement, la teneur en fibre de verre est d'approximativement 40 %. Les propriétés mécaniques des deux tissus utilisés sont données dans le Tableau 2-3.

Tableau 2-3. Propriétés mécaniques des tissus de fibre de verre utilisés.

Tissu DB 120	$E_L = 26.2$ Gpa	$\epsilon_L(\text{tension}) = 2.49\%$	$\epsilon_L(\text{compression}) = -2.08\%$
	$E_T = 6.55$ Gpa	$\epsilon_T(\text{tension}) = 0.33\%$	$\epsilon_T(\text{compression}) = -1.21\%$
	$E_Z = 6.55$ Gpa		
	$G_{LT} = 4.14$ Gpa	$\nu_{LT} = 0.39$	
	$G_{TZ} = 3.72$ Gpa	$\nu_{TZ} = 0.35$	
	$G_{LZ} = 3.72$ Gpa	$\nu_{LZ} = 0.32$	
Tissu A 130	$E_L = 31.7$ Gpa	$\epsilon_L(\text{tension}) = 2.53\%$	$\epsilon_L(\text{compression}) = -0.92\%$
	$E_T = 7.58$ Gpa	$\epsilon_T(\text{tension}) = 0.39\%$	$\epsilon_T(\text{compression}) = -1.05\%$
	$E_Z = 7.58$ Gpa		
	$G_{LT} = 3.45$ Gpa	$\nu_{LT} = 0.32$	
	$G_{TZ} = 3.10$ Gpa	$\nu_{TZ} = 0.32$	
	$G_{LZ} = 3.10$ Gpa	$\nu_{LZ} = 0.32$	

Pour la fabrication de la section de pale, un moule en bois en deux parties a été usiné à l'Université du Québec à Rimouski. Il a été usiné avec un état de surface d'une précision de 200 µm.

Après sablage et cirage de chaque moule, pour obtenir le meilleur état de surface possible, la fabrication des deux parties de la section de pale a été réalisée. Les moules ont tout d'abord été enduits au pinceau de Gelcoat (enduit gélifié) qui donne la couleur blanche de la pièce au démoulage. C'est une peinture à base de résine polyester à laquelle des pigments et des additifs (pouvoir couvrant, extenseur, etc.) ont été ajoutés. Elle confère à la pièce son état de surface final. Sa nature dépend du type de résine de base qui la constitue, qui est choisie selon le milieu dans lequel sera exposée la pièce. Les trois couches de tissus, DB120, A 130 et DB 120 ont ensuite été placées une par une dans chaque moule et imbibées au pinceau d'un mélange de résine et catalyseur. Enfin, les rebords utiles à l'assemblage des deux pièces ont été formés à l'aide d'un mélange de fibrettes de verre, de catalyseur et de résine. Cette étape a été très difficile à réaliser du fait de la viscosité importante de ce mélange et il en résulte des bulles d'air dans le produit fini (visibles en haut à gauche sur la Figure 2-9). Ces bulles n'ont pas la qualité du produit fini car le rebord ne sert qu'à la mise en place des deux pièces. Le temps de polymérisation de la résine est assez long. Par sécurité, les pièces sont laissées 48 heures à sécher avant démoulage. La forme des pièces (angles de dépouille importants) ainsi que le soin apporté à la préparation du moule permet un démoulage aisé. Les détails de l'une des pièces sont ainsi présentés à la Figure 2-9.

Le Gelcoat utilisé est un Gelcoat orthophtalique au néo-pentyl-glycol. Sa formulation chimique est : $\text{HOCH}_2\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{OH}$. C'est un produit sensible à l'humidité et soluble dans l'eau, le méthanol et l'acétone. De plus, il est trop poreux pour être utilisé comme surface extérieure finale. Par conséquent, le profil est peint avec une peinture époxy, chimiquement compatible avec le gelcoat. Une coloration bleue a été retenue pour permettre une meilleure observation visuelle du givre et une meilleure qualité d'image pour les photos. L'épaisseur moyenne finale du profil peint est de 2,1mm.



Figure 2-9. Pièce après démoulage, vue de dessus (à droite) et de dessous (à gauche).

2.2 Contrôle et régulation du système de chauffage

Le circuit électrique nécessaire à l'alimentation des éléments chauffants a été conçu par deux étudiants au baccalauréat en génie électrique à l'UQAC [36]. Il a été fabriqué au LIMA. Sa puissance totale est d'environ 3 000 W, soit environ 1.5 W/cm^2 . Cette puissance doit permettre de couvrir les cas de givrage les plus sévères et un coefficient de sécurité de 2 a été utilisé pour évaluer la puissance surfacique nécessaire.

2.2.1 Le circuit électrique

Le circuit électrique qui permet de répartir la puissance requise dans les éléments chauffants est présenté à la Figure 2-10. Ce circuit se trouve dans le boîtier électrique du système.

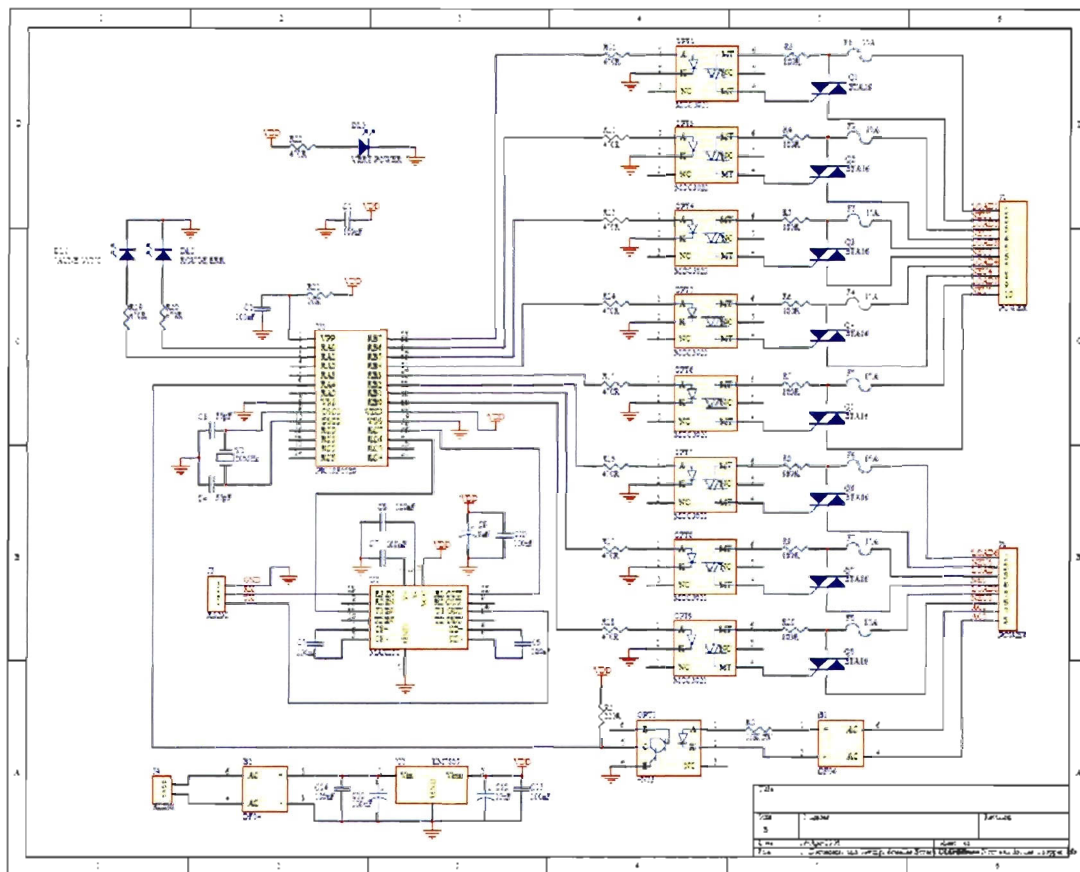


Figure 2-10. Schéma du circuit électrique.

Dans le but de réaliser des variateurs à courant alternatif, pour adapter la puissance nécessaire aux besoins du chauffage, des triacs (Triode Alternating Current) se trouvent à la droite du schéma. Un triac est un ensemble de deux thyristors en « antiparallèle », c'est-à-dire tête-bêche. Ce dispositif assure le contrôle de la mise en conduction et du blocage des deux alternances d'une tension et/ou d'un courant alternatif. Les triacs sont soumis à une tension de 120 VAC. Une isolation galvanique les sépare de la partie gauche du circuit où la tension est de 5 V. Le circuit dessiné en bas du schéma sert à l'ajustement de la basse tension. La tension d'entrée varie entre 5 et 15 V alors que la tension de sortie est toujours de 5 VDC.

La Figure 2-11 présente le boîtier électrique du système de dégivrage. Les convertisseurs 4/20 mA (1) transforment la tension envoyée par les thermocouples en un signal de courant, compréhensible par l'ordinateur. Le bornier (2) est la carte d'acquisition des données envoyées par chaque

thermocouple. Le circuit imprimé (3) contient les 8 fusibles des éléments chauffants, les 8 triacs et le microcontrôleur. Cette sécurité protège les éléments chauffants, et donc la section de pale, de toute surchauffe. Le transformateur (4) alimente les convertisseurs et fonctionne sous une tension de 28 VDC.

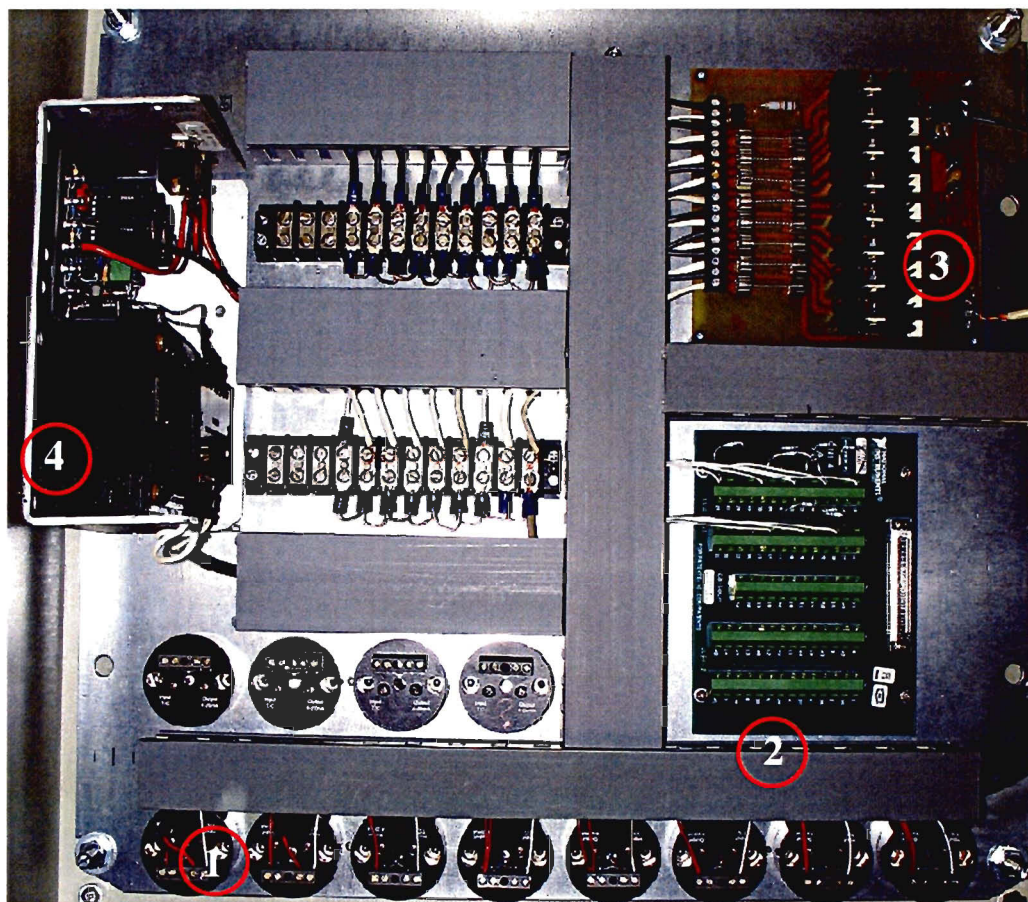


Figure 2-11. Boîtier électrique.

Ce boîtier est relié au réseau d'Hydro-Québec par une prise de courant classique, à l'ordinateur par la carte d'acquisition, aux thermocouples par un câble (bleu sur le montage) qui comprend les 12 fils des thermocouples et enfin aux éléments chauffants par un deuxième câble (gris sur le montage) qui comprend les fils d'alimentation des éléments chauffants.

2.2.2 Régulation du chauffage

La puissance électrique disponible pour alimenter les éléments chauffants est celle fournie par Hydro-Québec (110 V, 60 Hz). La puissance nécessaire aux éléments chauffants est celle calculée par le programme de contrôle du chauffage (voir Chapitre 3). Pour alimenter les éléments chauffants, les triacs du boîtier électrique sont amorcés à une valeur α appelée angle d'amorçage des triacs. Il en résulte une troncature d'une partie de la tension transmise aux éléments chauffants, comme illustré à la Figure 2-12.

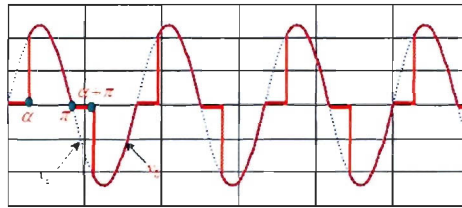


Figure 2-12. Effet de l'angle d'amorçage sur le signal.

Ceci permet de contrôler précisément la tension envoyée dans les éléments chauffants. Cependant, les besoins des éléments chauffants sont calculés en termes de puissance alors que le contrôle se fait sur la tension du signal. Par conséquent, le calcul de l'angle α se fait à partir de la puissance calculée.

P_s est la puissance fournie par v_s (en pointillés bleus sur la Figure 2-12) à l'élément chauffant de résistance R sur une période de temps de la tension (2π) :

$$P_s = 2 \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_0^2 \sin^2(t) dt = \frac{V_0^2}{R} \quad (6)$$

P_i est la puissance fournie par v_0 (en rouge sur la Figure 2-12) au même élément chauffant i de résistance R_i .

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{2}{R_i} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\pi} V_0^2 \cdot \sin^2(t) dt = \frac{2 \cdot V_0^2}{R_i} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos(2t)}{2} dt \\ &= \frac{2 \cdot V_0^2}{R_i} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{t}{2} - \frac{\sin(2t)}{4} \right]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_0^2}{R_i} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Les résistances R_i de chaque élément sont mesurées sur le système final et leur valeur réelle, qui diffère de la valeur théorique donnée par le constructeur, est enregistrée dans le programme de calcul. En supposant x , connu, tel que :

$$x = \frac{P}{P_s} \quad (8)$$

La valeur de α est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$x = 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi} \Leftrightarrow 2\pi(1-x) = 2\alpha - \sin(2\alpha) \quad (9)$$

Cette équation est traitée à l'aide de la méthode numérique itérative de Newton-Raphson [37]. L'équation de Newton-Raphson est l'une des formules de détermination de racine les plus employées. Elle s'applique aux équations du type $f(\alpha) = 0$ avec f dérivable et utilise la tangente en un point de la courbe de la fonction.

Une approximation de la racine de l'équation à résoudre est posée égale à α_0 . Le point $(\alpha_0, f(\alpha_0))$ est considéré comme premier point de tangence. α_1 est alors le point d'intersection de la tangente avec l'axe des abscisses, considéré comme nouvelle approximation de la racine cherchée et ainsi de suite comme illustré Figure 2-13.

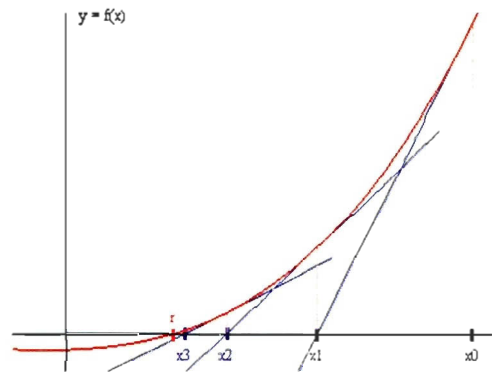


Figure 2-13. Méthode itérative de Newton-Raphson.

L'intersection de la tangente en α_i avec l'axe des abscisses est donnée par l'équation de récurrence de Newton-Raphson :

$$f'(\alpha_i) \cdot (\alpha_i - \alpha_{i+1}) - f(\alpha_i) = 0 \Leftrightarrow \alpha_{i+1} = \alpha_i - \frac{f(\alpha_i)}{f'(\alpha_i)} \quad (10)$$

Dans le cas présent, f est la fonction dérivable suivante :

$$f(\alpha) = 2\alpha - \sin(2\alpha) - 2\pi \cdot (1-x) \quad (11)$$

La fonction est étudiée sur l'intervalle $]0; \pi]$, elle est continue sur cet intervalle et le seul point qui pourrait entraver la convergence du calcul est le point d'abscisse 0. Cette valeur de $\alpha = 0$ correspond à $x = 1$, c'est-à-dire que la puissance nécessaire à l'alimentation des éléments chauffants est la puissance maximale disponible. Ce cas est écarté dans la programmation avant le calcul de x , il est donc impossible que le calcul converge vers 0. Le point d'amorce choisi est $\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$ car il est situé au milieu de l'intervalle. La convergence est quadratique (le nombre de chiffres significatifs double à chaque itération) donc très rapide.

2.2.3 Transfert de la valeur de l'angle d'amorçage

Dans la pratique, l'ordinateur communique avec le microcontrôleur à travers le port série par le biais d'une chaîne de caractères de la forme $StxxxxxxxxE$. Les 8 « x » forment un nombre binaire (succession de 0 et 1). Par conséquent, l'amplitude des valeurs envoyée par l'ordinateur s'étend de 0 à 255 (car $2^8 = 256$) avec une précision de $1/255^e$. L'angle d'amorçage, compris entre 0 et π est converti en une fraction sur 255. La conversion suit le schéma de la Figure 2-14.

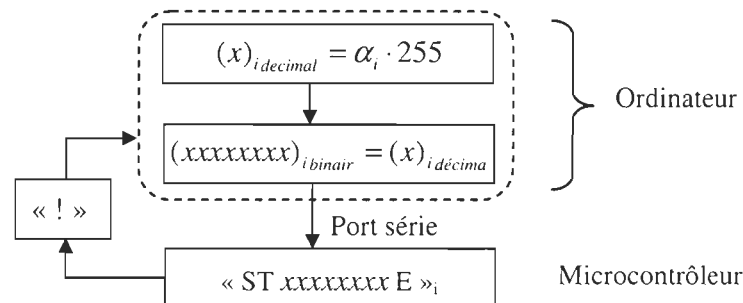


Figure 2-14. Transfert de l'angle d'amorçage de l'élément i au microcontrôleur.

Le microcontrôleur renvoie un signal « ! » à l'ordinateur pour confirmer que le signal reçu est bien de la forme « StxxxxxxxE » (pas d'erreur dans la transmission des données). Il se charge alors d'envoyer à chaque triac son angle d'amorçage (pour i variant de 0 à 7) et la variation du courant est ainsi contrôlée indépendamment pour chaque élément chauffant.

2.3 Paramètres de commande du chauffage

Le fonctionnement global du montage expérimental est décrit dans cette section. L'instrumentation du profil et les améliorations et modifications qui lui ont été apportées sont détaillées. De plus, les fondements théoriques de la loi de commande utilisée sont décrits.

2.3.1 Instrumentation du profil

La section de pale a la même largeur que la section d'essai de la soufflerie, à savoir 0.5 m. Pour pouvoir étudier le chauffage sans l'influence des effets de bord de la soufflerie, le profil est « découpé » fictivement en trois zones (voir Figure 2-15).

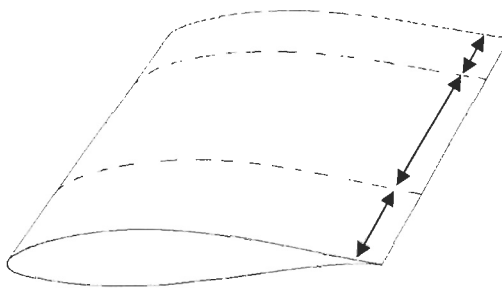


Figure 2-15. Sectionnement fictif du profil.

Les deux zones latérales, près des bords de la zone d'essai, sont chauffées dans le but de maintenir un flux longitudinal nul et sont thermiquement identiques. Par conséquent et pour alléger le montage, seule une d'entre elles est instrumentée. De plus, la partie centrale est la plus instrumentée car c'est la partie étudiée.

La surface du profil est séparée en six domaines (voir Figure 2-16). Le chauffage est assuré par un ensemble d'éléments chauffants souples, en Kapton, contrôlés indépendamment les uns des autres. Ceux-ci sont fournis sous la référence KH 108/10 par la compagnie OMEGALUX®. Ils ont une

puissance maximale de 10 W/po^2 (1.55 W/cm^2) et une épaisseur est de 0.254 mm . Le bord de fuite est recouvert d'éléments chauffants sur l'intrados et sur l'extrados, mais en raison de l'angle d'attaque important, l'intrados reçoit plus de gouttelettes d'eau. Le bord d'attaque, le plus exposé au givrage, est recouvert d'éléments chauffants sur une plus grande surface. Les éléments chauffants 0, 2 et 3 ont une longueur de 25.4 mm (1 po) et l'élément 1 a une longueur de 50.8 mm (2 po).

Les quatre zones chauffées de la section centrale sont contrôlées indépendamment les unes des autres. Les huit zones chauffées des sections latérales sont chauffées identiquement deux à deux car les deux sections sont considérées comme thermiquement identiques entre elles. L'étendue des éléments chauffants est déterminée à partir des résultats expérimentaux obtenus par Hochart [25]. Le détail de cette répartition est donné à la Figure 2-16.

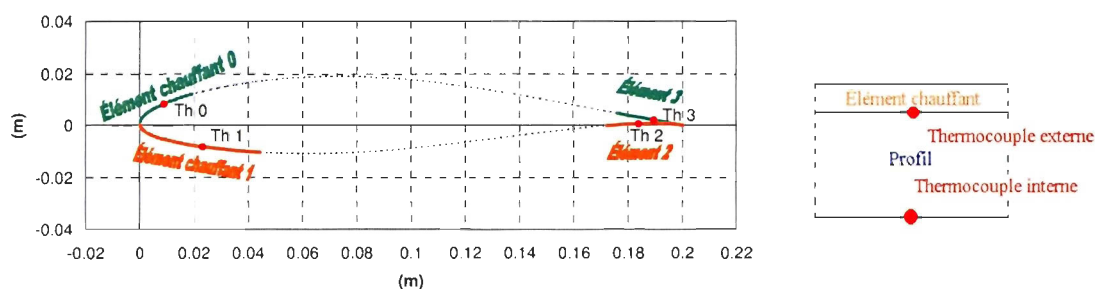


Figure 2-16. Répartition des éléments chauffants et des thermocouples sur le profil.

Un ensemble de 12 thermocouples est installé sur le profil pour observer l'évolution de la température surfacique en diverses positions. Huit de ces capteurs thermiques sont placés à la surface externe de la pale pour enregistrer l'évolution temporelle de la température dans les zones chauffées, quatre sur la zone centrale et quatre sur une des zones latérales. Les quatre autres thermocouples sont placés dans la zone centrale, sur la surface interne du profil, en vis-à-vis des thermocouples externes pour évaluer le flux thermique à travers l'épaisseur de la pale, c'est-à-dire les pertes énergétiques dans le profil. La superposition des différentes composantes au niveau des thermocouples est présentée à la Figure 2-16 à droite. Les thermocouples sont placés au centre de chaque élément chauffant. Les fils des thermocouples et des éléments chauffants sont regroupés, à la sortie de la section de pale, dans un câble relié à l'ordinateur par l'intermédiaire du boîtier électrique. L'intérieur de la section de pale est présenté à la Figure 2-17.

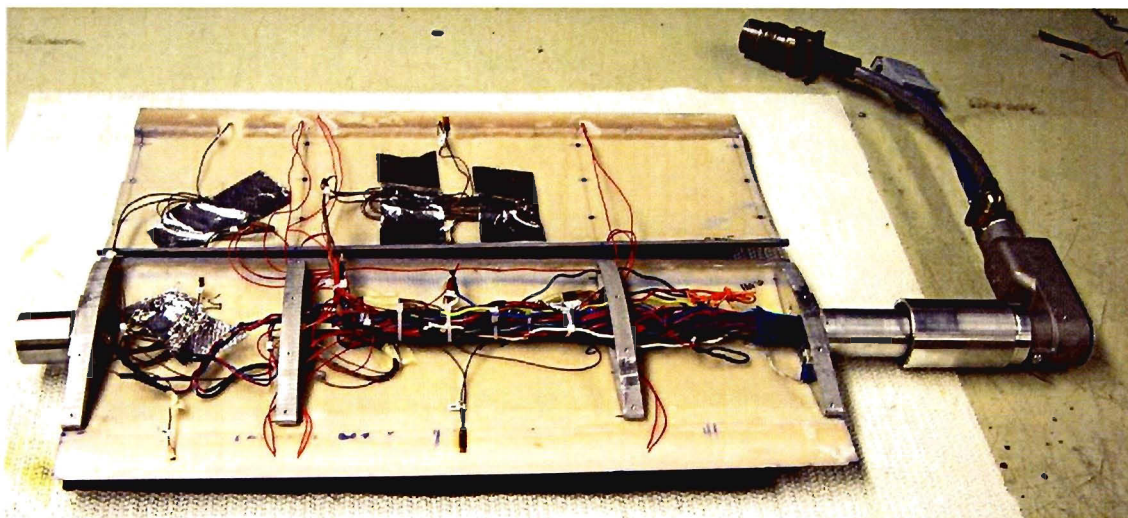


Figure 2-17. Vue de l'intérieur de la section de pale.

Finalement, la Figure 2-18 présente la section de pale utilisée pour les essais. Les éléments chauffants sont visibles en orange. Des bandes d'aluminium autocollant sont utilisées sur les bords d'attaque et de fuite, de même que sur chaque section latérale du profil pour assurer son étanchéité. Elles contribuent également au maintien des éléments chauffants. En effet, de l'eau s'infiltre sous les rebords des éléments lors du dégivrage du profil. Cette eau gèle lorsque le profil est réintroduit dans la soufflerie. Sous l'impact des multiples cycles gel/dégel, les éléments chauffants se décolle relativement rapidement.

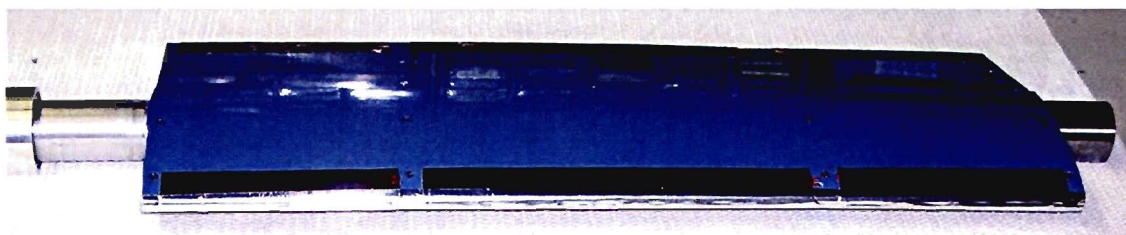


Figure 2-18. Section de pale utilisée pour les essais.

La section de pale installée dans la zone d'essais est présentée à la Figure 2-19 telle qu'elle a été utilisée pour les essais présentés au Chapitre 3. Elle est maintenue par deux liaisons pivot à chaque extrémité de la zone d'essais, dont l'une d'elles est instrumentée pour pouvoir ajuster l'angle d'attaque à la valeur désirée (voir Annexe B). Un moteur électrique relié à l'ordinateur permet de maintenir l'angle d'attaque désiré dans la soufflerie.

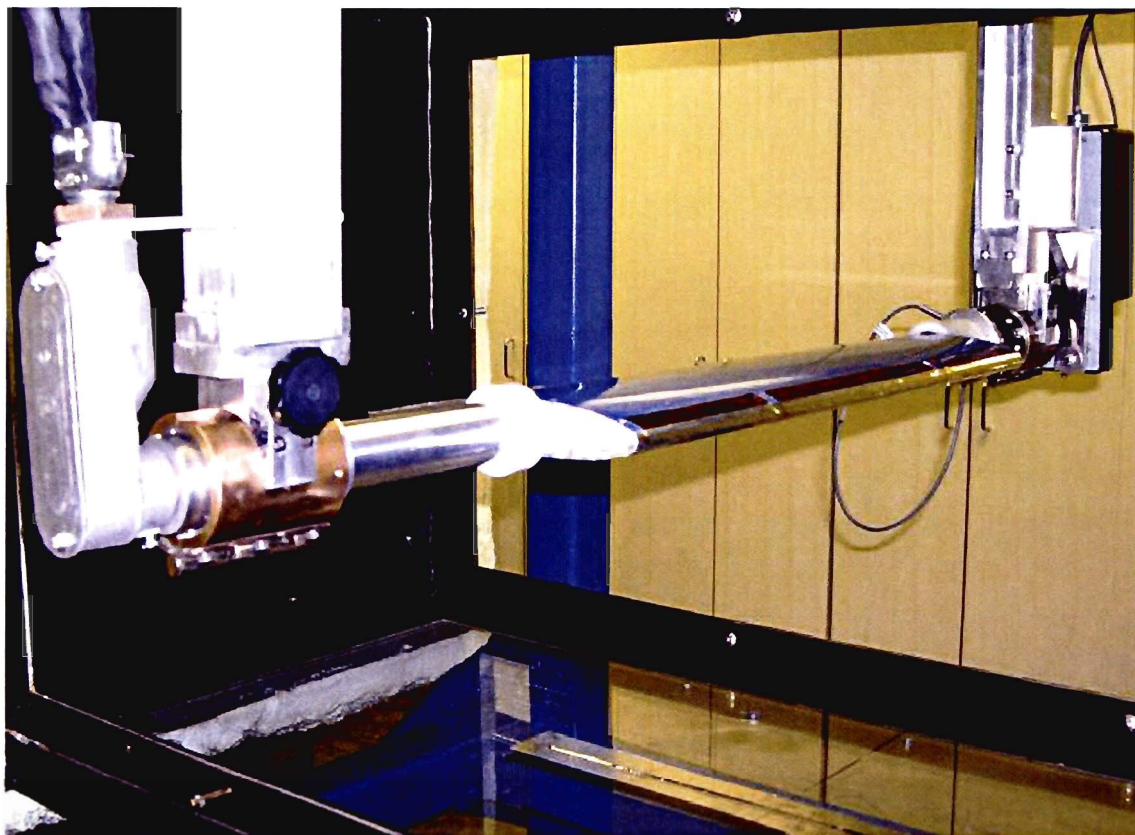


Figure 2-19. Section de pale installée dans la zone d'essais.

Les premiers tests de givrage ont permis de relever des irrégularités dans les températures enregistrées par les thermocouples ainsi que dans l'évolution du chauffage. Les corrections détaillées à la section suivante ont été apportées au système.

2.3.2 Améliorations apportées

Une observation attentive du système a montré que les fils des thermocouples n'étaient pas étanches à l'eau et que beaucoup de condensation se formait à l'intérieur du profil après chaque essai. Par conséquent, tous les thermocouples ont dû être étanchéifiés un par un. Une gaine thermo rétractable a été utilisée et du silicone (rouge) a été appliqué autour des thermocouples (voir Figure 2-20).

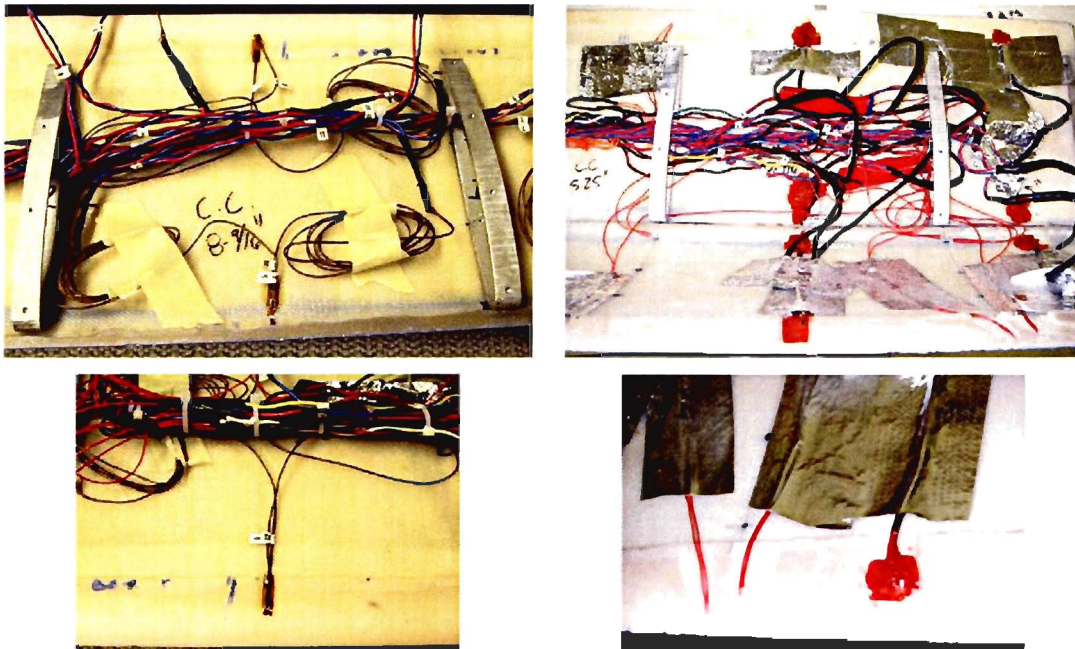


Figure 2-20. Isolation des thermocouples.

Par ailleurs, le connecteur choisi dans un premier temps pour relier les fils des thermocouples avec le câble de liaison pour l'ordinateur (câble bleu), a dû être changé en raison de faux contacts entre les broches (pins) des fils qui perturbaient la transmission des signaux. Des prises indépendantes, au nombre de 12, ont donc été installées. (Figure 2-21)

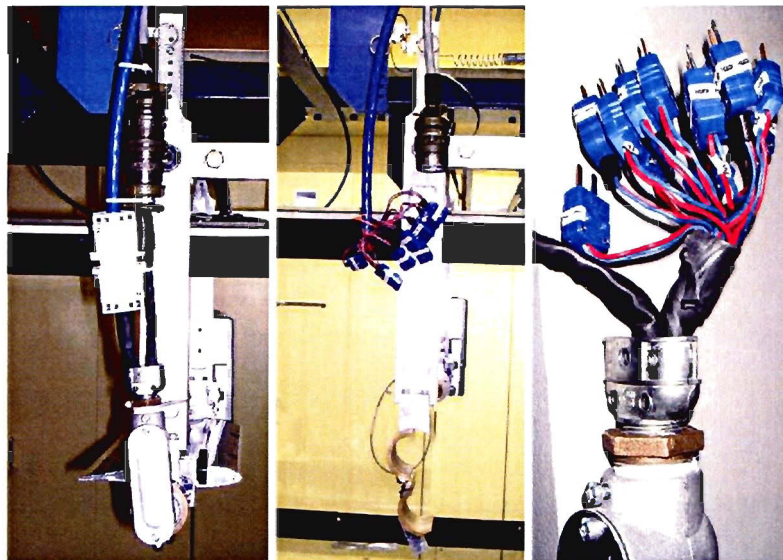


Figure 2-21. Modification de la prise des fils de thermocouples.

2.3.3 Loi de commande du système de chauffage

L'intensité du dégivrage est basée sur le calcul de la puissance électrique nécessaire à l'alimentation des éléments chauffants. Ce calcul se fait à l'aide de la température relevée à la surface du profil et repose sur l'énergie perdue par convection pour maintenir la surface de l'élément chauffant à la température désirée. Les transferts énergétiques par conduction, évaporation, radiation et chauffage adiabatique sont considérés négligeables par rapport à l'énergie de convection. En effet, le chauffage adiabatique est faible devant la convection lorsque le nombre de Mach est inférieur à 0.3, ce qui est le cas ici. La conduction est négligeable devant la convection lorsque le nombre de Biot est grand. En raison de la faible température de l'air, l'évaporation est minime au cours de l'accumulation de glace et la radiation est négligeable en raison des nuages présents au cours d'un évènement de givrage sur une éolienne. Le coefficient de transfert de chaleur par convection pour une plaque plane soumise à un écoulement d'air est donc utilisé comme valeur de référence dans la loi de commande.

Le coefficient de transfert de chaleur calculé dépend de la densité de l'air, de la chaleur spécifique à pression constante, de la vitesse relative du vent et du nombre de Stanton :

$$h_1 = \rho_{air} \cdot c_{p_a} \cdot U_{rel} \cdot St \quad (12)$$

Le nombre de Stanton est défini en fonction du coefficient de friction :

$$St = \frac{1}{2} \cdot c_f \quad (13)$$

Le coefficient de friction moyen est calculé à partir du coefficient de friction local en régime turbulent [38] car la présence de glace sur le profil rend l'écoulement turbulent au niveau du profil :

$$c_f(x) = \frac{0.0576}{Re_x^{0.2}} \text{ d'où } c_f = \frac{0.072}{Re^{0.2}} \quad (14)$$

Il existe d'autres formules pour le calcul du coefficient de friction [38] telles que la loi empirique de H. Schlichting qui donnent des résultats similaires. Le nombre de Reynolds s'exprime en fonction de la densité de l'air, de la vitesse relative du vent, de la corde du profil et de la viscosité de l'air :

$$Re = \frac{\rho_{air} \cdot U_{rel} \cdot c}{\mu_{air}} \quad (15)$$

Le chauffage dépend donc de la vitesse relative au niveau du profil et, par conséquent, de la position radiale sur la pale. Le Chapitre 3 donne les différentes conditions expérimentales étudiées et les conditions de chauffage qui leur sont associées.

Pour le calcul de la puissance électrique P nécessaire à l'alimentation des éléments chauffants, le schéma du transfert thermique du système est présenté à la Figure 2-22.

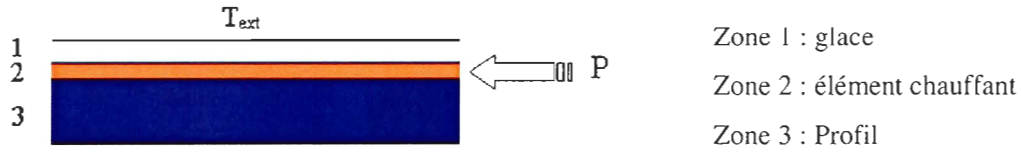


Figure 2-22. Modèle du transfert thermique autour du profil.

Le régime transitoire est négligé :

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT_s}{dt} = 0 \quad (16)$$

En régime stationnaire, la puissance fournie au système tel qu'illustré à la Figure 2-22 est estimée :

$$P = h_1 \cdot A \cdot (T_\infty - T_s) \quad (17)$$

Où A est l'aire de l'élément chauffant, T_∞ et T_s sont respectivement la température de l'air et la température de surface mesurée et h_1 est le coefficient de transfert de chaleur. Cette loi ne tient pas compte de la différence entre la température mesurée à la surface du profil par les éléments chauffants et la température désirée T_c . Elle est donc « corrigée » pour intégrer la différence entre la température cible T_c et la température mesurée par les thermocouples T_s , ce qui correspond aux pertes thermiques. Ainsi un terme de puissance est ajouté à l'Équation 17 :

$$\Delta P = h_1 \cdot A \cdot (T_s - T_c) \quad (18)$$

Finalement, la loi de puissance globale du système est :

$$P = h_1 \cdot A \cdot (T_\infty - T_s) + h_1 \cdot A \cdot (T_s - T_c) \quad (19)$$

Mathématiquement, une simplification est possible dans l'équation 19. Cependant, d'un point de vue physique, le calcul de la puissance tient compte de la température mesurée par les thermocouples T_s , donc cette grandeur ne doit pas disparaître de l'équation.

2.3.4 Fonctionnement du contrôle du chauffage

Le contrôle est assuré par un programme informatique en Visual Basic. Ce programme est muni d'une sécurité qui limite la température de surface du profil. En effet, le tissu de fibre de verre qui constitue le profil peut supporter des températures allant jusqu'à 175°C, la résine utilisée peut supporter jusqu'à 100°C environs sans diminution de ses propriétés mécaniques.

Par sécurité, la température maximale a été fixée à 50°C. Pour une éolienne, étant donné les matériaux actuellement utilisés par les fabricants de pales (plastique renforcé par de la fibre de verre), la température du système de chauffage ne doit pas excéder 50°C [14].

Le temps de réponse du système ainsi que la valeur du dépassement de la cible sont fixés afin de contrôler la rapidité et la précision du système. Un récapitulatif des différents flux de données entre chaque entité du système est présenté à la Figure 2-23.

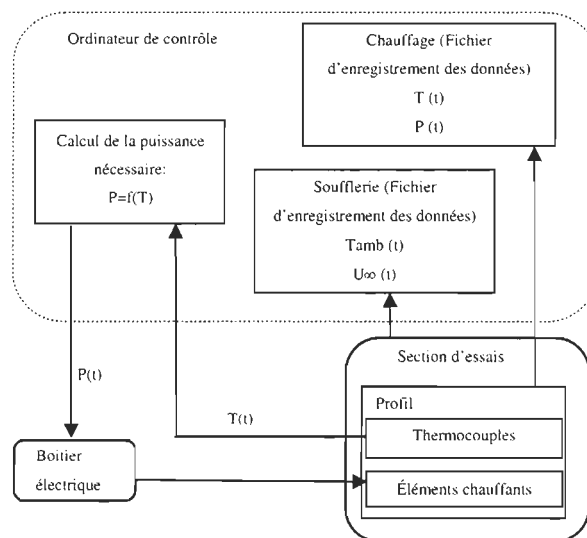


Figure 2-23. Schéma du fonctionnement du système.

2.4 Fonctionnement de la soufflerie

Toutes les expériences sont réalisées en soufflerie réfrigérée en boucle fermée. La soufflerie se situe dans les locaux du LIMA à l'Université du Québec à Chicoutimi. Une description des composantes de la soufflerie est présentée à la Figure 2-24.

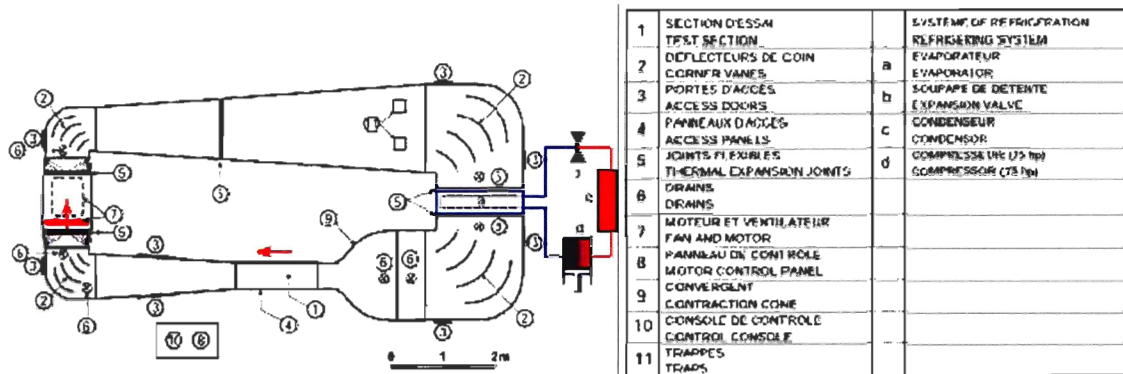


Figure 2-24. Description de la soufflerie réfrigérée

La soufflerie est composée d'un tunnel où l'air évolue en circuit fermé, d'un moteur (7) d'une puissance de 50 HP, soit 37.3 kW, à 3600 tr/min qui génère une circulation d'air à la vitesse désirée (pouvant aller jusqu'à 70 m/s), d'un échangeur thermique de 35 HP, soit 26.1 kW (a, b, c et d) qui refroidit et contrôle la température de l'air, dans une plage de +20°C à -30°C. Différents capteurs pour mesurer et contrôler les températures, vitesses, etc. sont également installés dans la soufflerie. On retrouve la fiche des caractéristiques de cette soufflerie en Annexe D. Le contrôle des paramètres de la soufflerie ainsi que le déclenchement du départ des essais est géré par un logiciel développé par le LIMA en langage Visual Basic « Soufflerie 2000 ». Il permet l'enregistrement de tous les paramètres utiles durant toutes les expérimentations (T_{air} , U_{rel} et α).

Pour simuler le brouillard givrant, une rampe de cinq gicleurs équidistants est installée devant le convergent (9), en amont de la zone d'essais (1). La rampe de gicleurs est soumise à une oscillation verticale afin d'obtenir une teneur en eau homogène sur toute la hauteur de la section d'essais. La gamme de teneurs en eau qu'il est possible de simuler dans la soufflerie varie de 0,15 à 4 g/m³.



Figure 2-25. Rampe de gicleurs. (Vue de dos à gauche et de face à droite)

La fréquence de l'oscillation de la rampe est contrôlée et le départ des oscillations se fait manuellement. Un boîtier électrique (voir Figure 2-26) permet de commander la fréquence des oscillations de la rampe, le départ et l'arrêt de la rampe, le chauffage des gicleurs et des tuyaux d'arrivée d'eau (pour éviter qu'ils ne gèlent) et le contrôle de la température dans la zone d'essai.

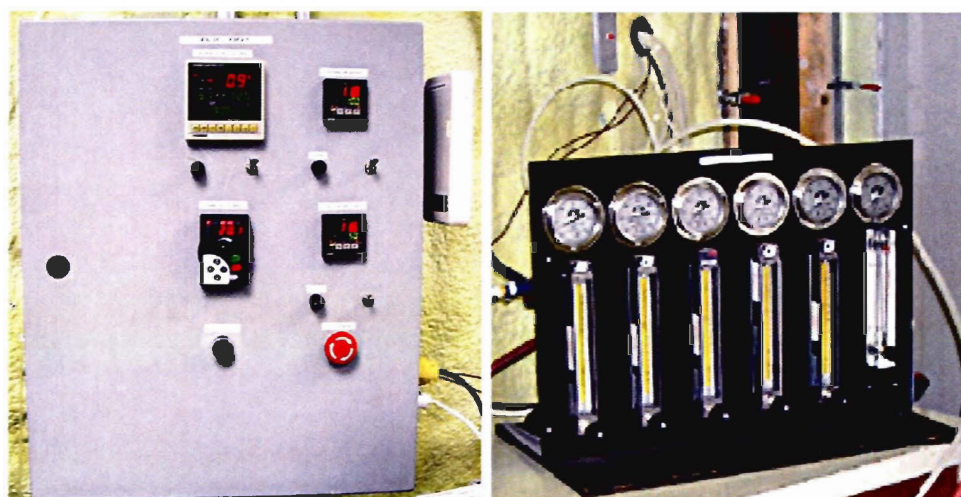


Figure 2-26. Boîtier de contrôle de la soufflerie et panneau de contrôle du débit des gicleurs.

L'alimentation des gicleurs se fait à partir d'un réservoir d'eau sous pression maintenu à $+4^{\circ}\text{C}$. Le débit d'eau, et donc la teneur en eau dans la section d'essai, est fixé indépendamment dans les cinq gicleurs et le débit d'air, qui contrôle la grosseur des gouttelettes à la sortie des gicleurs est fixé pour l'ensemble de la rampe (voir Figure 2-26).

Le panneau de sélection de la pression d'air est présenté à la Figure 2-27. L'air sous pression arrive par le tuyau bleu à droite et la pression du réservoir d'eau et des gicleurs est fixée à gauche du panneau.

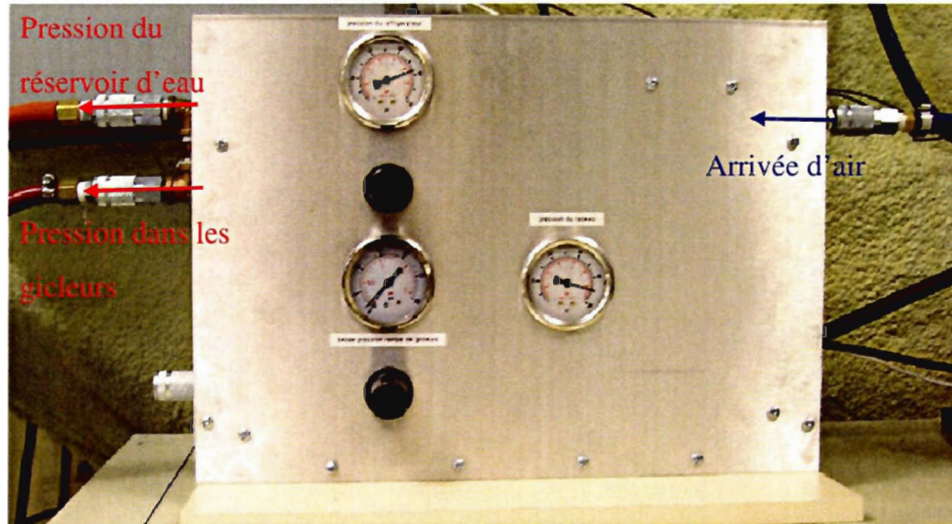


Figure 2-27. Gestion de la pression d'eau dans la soufflerie.

Le système global de gestion de l'eau sous pression dans la soufflerie est résumé à la Figure 2-28. Les tuyaux d'alimentation en eau des gicleurs entrent dans la soufflerie par une gaine isolante dans laquelle l'air est maintenu à une température d'environ $+11^{\circ}\text{C}$ afin d'éviter que l'eau ne gèle.

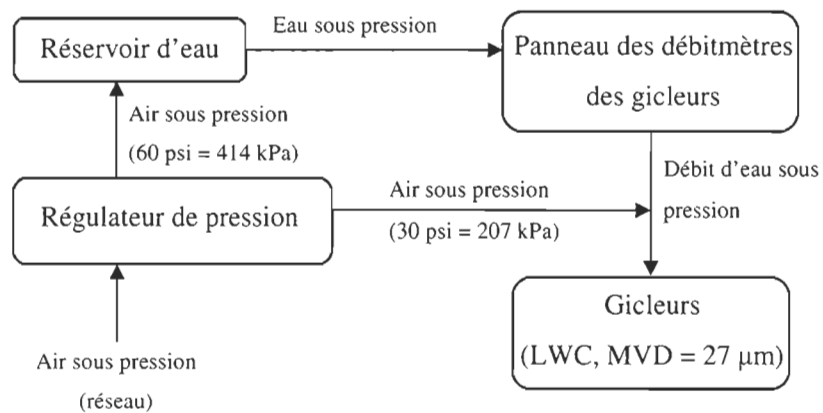


Figure 2-28. Système global de gestion de l'eau sous pression dans la soufflerie.

La section d'essais dans laquelle est introduite la section de pale mesure 0,6 m de haut et 0,5 m de large. La Figure 2-29 présente la section d'essais de la soufflerie avec les câbles des thermocouples (bleu) et des éléments chauffants (gris) reliés à l'ordinateur de gestion du dégivrage.

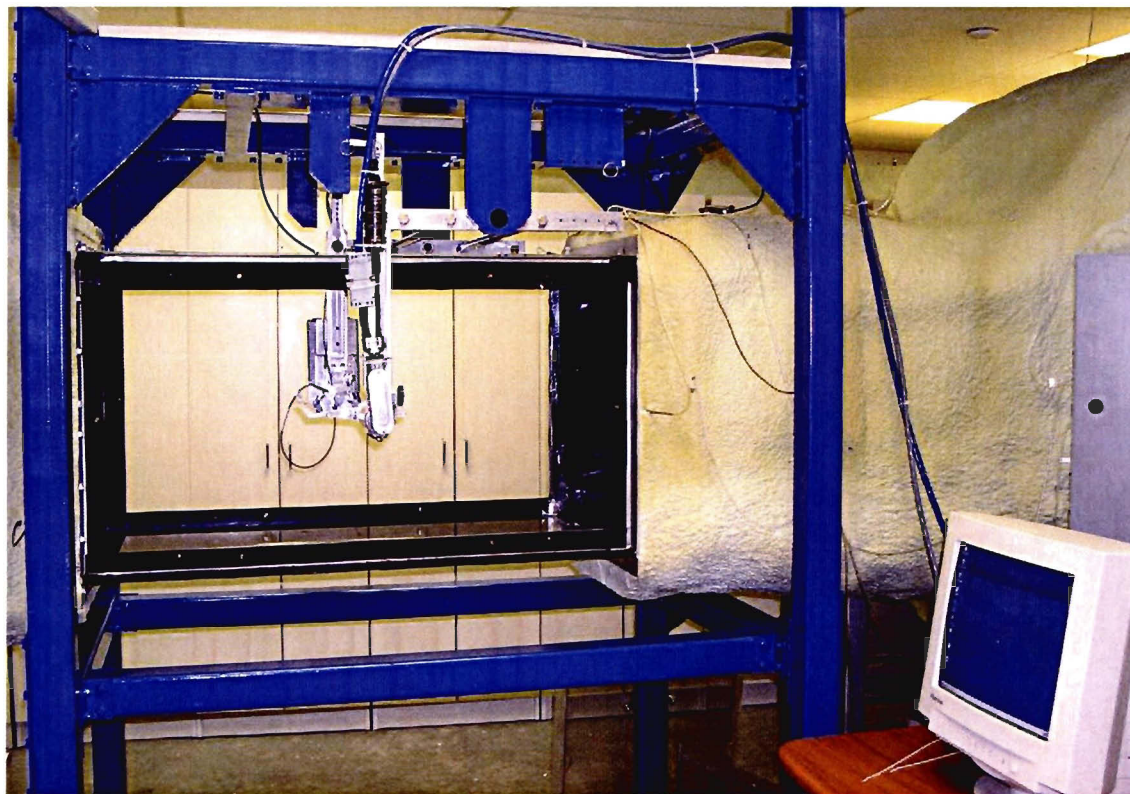


Figure 2-29. Zone d'essais de la soufflerie.

Il est important de noter, pour l'analyse des résultats expérimentaux, que cette soufflerie présente les particularités suivantes :

- Les dimensions de la section d'essai sont légèrement trop faibles par rapport aux dimensions du profil utilisé lorsque l'angle d'attaque est supérieur à 6° , ceci a pour effet d'introduire des effets de bord en hauteur dans l'écoulement d'air autour du profil. Ces modifications dans l'écoulement sont cependant négligées dans cette étude car elles sont relativement faibles.
- La longueur de la soufflerie est insuffisante pour supprimer les effets de rotation de l'air, par conséquent le flux arrivant du côté interne au circuit de la soufflerie arrive légèrement plus vite que celui du côté externe et l'aile ne se trouve pas exactement dans les mêmes conditions de vent sur toute sa largeur. Cet effet est également négligé dans l'étude car seule la partie centrale du profil est étudiée et l'écoulement y est d'intensité égale.

- La teneur en eau n'est pas constante dans la largeur de la section d'essai. La position des gicleurs est homogène en hauteur du fait de l'oscillation verticale de la rampe de gicleurs, mais la répartition horizontale des gouttelettes n'est pas tout à fait homogène dans la section d'essais. La présence de cinq gicleurs sur la rampe diminue d'autant ce défaut, mais on constate en observant le cylindre durant l'étalonnage des teneurs en eau (en Annexe D) que l'épaisseur de glace n'est pas homogène sur toute la longueur du cylindre. Les effets thermiques des bords de la section d'essai, parce que la température de la pièce est supérieure à celle de la section d'essai, réduisent l'accrétion de glace aux extrémités latérales de la section d'essai, mais comme indiqué précédemment, seule la section centrale du profil est étudiée donc cet effet peut être négligé.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les enregistrements de température et de puissance ainsi que les formes et répartitions de la glace sur le profil sont présentés et analysés dans ce chapitre. Les conditions expérimentales déterminées pour la soufflerie sont détaillées dans un premier temps puis les essais préliminaires réalisés sont décrits. Les différents résultats qui en découlent aident à l'interprétation des données enregistrées. En particulier, la reproductibilité des tests est démontrée et l'optimisation du chauffage est étudiée. Les résultats des essais réalisés à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ sont ensuite présentés en détails.

Ce chapitre répond dans un premier temps à l'objectif 3 décrit au premier chapitre : l'élaboration des règles de similitude pour l'application des conditions de givrage réelles dans la soufflerie. Puis il répond aux parties a et b de l'objectif 2 en permettant de définir l'impact des conditions de givrage (vitesse et température de l'air) sur le système d'une part et l'influence des paramètres de chauffage sur l'efficacité du dégivrage d'autre part.

3.1 Les conditions expérimentales et la similitude

Les conditions expérimentales se basent d'une part sur des événements météorologiques relevés par une tour de mesure et d'autre part sur les conditions de chauffage calculées d'après la théorie. Les mesures météorologiques déterminent les conditions de simulation dans la soufflerie et leur mise à l'échelle ce qui permet d'interpréter, pour l'éolienne considérée, les résultats observés en laboratoire.

3.1.1 Conditions météorologiques

Le système de dégivrage est développé en considérant comme référence les données météorologiques du site éolien de Murdochville. Ce site dispose d'un fort potentiel éolien (moyenne des vents de 7 à 8 m/s) et subit, d'après les campagnes de mesure de 2004-2005 et 2005-2006, 13 à 16 événements de brouillard givrant par hiver ([29] et [30]).

Parmi les événements de givrage observés à la station de mesure de Murdochville, deux événements représentatifs ont été considérés pour définir les conditions expérimentales de givrage (Tableau 3-1). La durée t et le taux d'accumulation T_{ac} d'un événement permettent de déterminer la nuisibilité de cet événement pour l'éolienne. Ces deux paramètres sont donc très importants dans le choix des conditions de simulation. Le diamètre moyen des gouttelettes (MVD, Median Volumetric Diameter) ne peut être enregistré sur le site en raison du coût très important des instruments de mesure de MVD. Il est estimé en utilisant la corrélation empirique développée par Best [39]. Best a analysé toutes les données expérimentales existantes sur les brouillards et a exprimé la teneur en eau liquide (LWC, Liquid Water Content) par une fonction puissance qui dépend du diamètre maximal des gouttelettes d_{max} et de deux constantes C et n qui valent respectivement 0.0003181 et 1.7921 :

$$LWC = C \cdot d_{max}^n \quad (20)$$

Tableau 3-1. Évènements de givre considérés.

LWC (g/m ³)	MVD (μm)	U_{∞} (m/s)	T_{amb} (°C)	t (min)	T_{ac}
0.218	38.3	8.8	-1.4	360	7.27
0.242	40.5	4.2	-5.7	264	3.27

Les paramètres météorologiques utilisés pour déterminer les conditions expérimentales en soufflerie sont présentés au Tableau 3-2. La principale différence avec les conditions observées par la station de mesure (Tableau 3-1) est la température utilisée pour les simulations. Celle-ci est choisie de manière à pouvoir observer certains phénomènes tels que le givrage à la température limite de solidification de l'eau lors des essais préliminaires et le givrage en régime sec.

Tableau 3-2. Caractéristiques de l'évènement de givrage considéré pour les tests

LWC (g/m ³)	MVD (μm)	U_{∞} (m/s)	t (min)
0.218	38.3	8	360

Ces valeurs sont mises à l'échelle à la section suivante pour les simulations sous conditions givrantes dans la soufflerie réfrigérée du LIMA.

3.1.2 Conditions de l'éolienne

L'éolienne considérée pour les tests est celle utilisée pour la conception du système. Elle est présentée en détails au Chapitre 2. La section de pale utilisée pour les essais est unique et a donc les mêmes dimensions pour tous les tests, en particulier la même corde. Cependant, la corde réelle évolue le long de la pale. Il est donc important de savoir pour quel rayon de pale les tests sont effectués afin de mettre correctement à l'échelle les tests en soufflerie par rapport aux conditions réelles. De plus, pour un rayon de pale donné correspond une unique vitesse relative (U_{rel}). Le paramètre contrôlé dans la soufflerie étant la vitesse d'essai, la position radiale de la section de pale étudiée doit être calculée en fonction de cette vitesse. La Figure 3-1 présente les différentes vitesses considérées sur le profil pour cette étude.

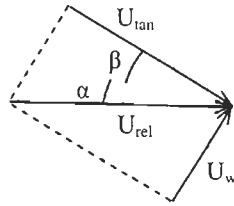


Figure 3-1. Vitesse du vent au niveau du profil.

La vitesse relative U_{rel} exprimée par l'équation 21 et simulée dans la soufflerie est la combinaison de la vitesse du vent U_w et de la vitesse due à la rotation de la pale U_{tan} :

$$U_{rel} = \sqrt{U_w^2 + U_{tan}^2} \quad (21)$$

La vitesse du vent qui arrive sur la pale est exprimée, d'après la théorie du disque rotor [31] comme une fonction de la vitesse de l'écoulement non perturbé U_∞ et du facteur axial d'induction a :

$$U_w = (1 - a) \cdot U_\infty \quad (22)$$

La vitesse tangentielle U_{tan} dépend de la distance r de la section analysée par rapport au moyeu de la pale. Elle dépend aussi de la vitesse de rotation de la pale ω et du facteur d'induction tangentiel a' :

$$U_{tan} = (1 + a') \cdot \omega \cdot r \quad (23)$$

D'après la théorie du disque rotor, lorsque l'air est considéré comme un gaz parfait, les performances optimales sont obtenues quand le facteur d'induction axial est :

$$a = \frac{1}{3} \quad (24)$$

et le facteur d'induction tangentiel est :

$$a' = \frac{U_{\infty}^2 \cdot a \cdot (1 - a)}{\omega^2 \cdot r^2} \quad (25)$$

La relation entre la position radiale sur la pale r et la vitesse de vent relative U_{rel} dans la soufflerie est finalement exprimée par l'équation (26) :

$$r = \frac{\omega \cdot \sqrt{U_{rel}^2 - U_w^2} + \sqrt{(U_{rel}^2 - U_w^2) \cdot \omega^2 - 4 \cdot \omega^2 \cdot \frac{2}{9} \cdot U_{\infty}^2}}{2 \cdot \omega^2} \quad (26)$$

Les tests sont réalisés pour trois vitesses de vent relatives différentes: 20 m/s, 30 m/s et 40 m/s. D'après les calculs précédents, le Tableau 3-3 présente les positions radiales sur la pale qui correspondent aux vitesses sélectionnées pour la soufflerie. La corde c indiquée correspond à la corde du profil situé à la position radiale correspondante pour l'éolienne Vestas V80 de 1.8 MW.

Tableau 3-3. Position radiale et corde réelles correspondant aux vitesses choisies pour les tests.

N° test	U_{∞} (m/s)	U_w (m/s)	U_{rel} (m/s)	r (m)	c (m)
1	8	5.33	20	10.6	2.7
2	8	5.33	30	16.6	2.3
3	8	5.33	40	22.5	1.8

D'après les conditions de givrage et les caractéristiques géométriques, les paramètres réels sont mis à l'échelle à l'aide d'un logiciel développé par Fortin [4] évoquée plus en détails à la section 3.1.3.

3.1.3 Conditions de similitude

Dans le but de réaliser des expériences représentatives de conditions de givrage de sites éoliens, une mise à l'échelle rigoureuse a été réalisée. Elle tient compte des paramètres de l'éolienne (dimensions, régime de fonctionnement) et des phénomènes de givrage mesurés. Elle permet de reproduire en soufflerie la forme de givre sur la section de pale en fonction du profil et des conditions atmosphériques réelles.

L'utilisation d'un logiciel de mise à l'échelle développé par Fortin pour le LIMA a facilité ce travail. Il repose sur la méthode d'Anderson [40] qui est basée sur la similitude de l'accrétion de glace dans le but de reproduire en soufflerie des événements de givrage enregistrés sur des sites de mesure. Cette méthode donne d'excellents résultats pour l'accrétion en régime sec mais est moins précise en régime humide et à la frontière des régimes sec/humide.

Les variables indépendantes prises en compte dans la similitude sont :

- la vitesse relative de l'objet (U_{rel} en m/s)
- la teneur en eau liquide (LWC en g/m³)
- le diamètre moyen des gouttelettes d'eau (MVD en μm)
- la corde de l'objet (c en m)
- le temps d'accrétion (τ en min.)

Parmi ces variables, la vitesse relative U_{rel} , le diamètre volumétrique moyen des gouttelettes d'eau MVD et la corde de l'objet sont des variables fixées (soit par l'utilisateur soit par des contraintes matérielles).

Les paramètres nécessaires aux expérimentations sont calculés en fonction des paramètres mesurés sur site, en imposant certaines conditions de similitude. Le logiciel tend donc à trouver une solution qui vérifie au mieux le système composé des équations (27) à (38). La signification des symboles utilisés dans ces relations se trouve au début du mémoire dans la section « Liste des symboles ».

La similitude de l'écoulement par rapport à la température est respecté lorsque les températures globales T_g exprimées de la manière suivante :

$$T_g = T_0 = T_a + \frac{\rho_a \cdot U^2}{2 \cdot c_{p,a}} \quad (27)$$

sont identiques dans la soufflerie et lors de l'évènement enregistré. La température T_a est la température de l'écoulement dans la soufflerie, U est sa vitesse, ρ_a la densité de l'air et $c_{p,a}$ la chaleur spécifique à pression constante de l'air.

La similitude de l'évolution des trajectoires des gouttelettes d'eau est respectée lorsque les coefficients de collection au point de stagnation sont identiques dans les deux situations. Ce

coefficient dépend uniquement du nombre de Stokes modifié [41], c'est donc celui-ci qui est pris en compte dans la similitude :

$$St_0 = \frac{MVD^2 \cdot U^{0.64}}{d_c^{1.24} \cdot P_a^{0.48}} \quad (28)$$

La similitude de l'évolution en temps est respectée lorsque les paramètres d'accumulation A_c sont égaux :

$$A_c = \frac{LWC \cdot U \cdot \tau}{f \cdot d_c \cdot \rho_i} \quad (29)$$

La similitude thermique est respectée lorsque les termes de chaleur de la conservation d'énergie sont dans les mêmes proportions dans la soufflerie et dans le cas réel. Cette similitude est évidemment calculée sans chauffage. L'égalité à vérifier dans les deux cas est la suivante :

$$Q_f + Q_{ss} + Q_{dif} + Q_{cv} + Q_{adh} + Q_{kin} = 0 \quad (30)$$

La chaleur latente de solidification est l'énergie libérée par le passage de l'eau de l'état liquide à l'état solide :

$$Q_f = f \cdot L_f \cdot \beta_0 \cdot LWC \cdot U \cdot c \cdot L \cdot \tau \quad (31)$$

La chaleur sensible est libérée par le changement d'enthalpie de l'eau, engendré par son évolution en température :

$$Q_{ss} = \beta_0 \cdot LWC \cdot U \cdot c_{p,w} \cdot (T_a - T_s) \cdot c \cdot L \cdot \tau \quad (32)$$

La chaleur de convection est libérée lors du contact de l'air avec la surface de l'objet en raison de la différence de température. La vitesse de l'air implique un régime de convection forcée et la chaleur de convection est calculée selon la loi de refroidissement de Newton :

$$Q_{cv} = h_c \cdot (T_a - T_s) \cdot c \cdot L \cdot \tau \quad (33)$$

La chaleur de diffusion est la perte de chaleur par évaporation dans la couche limite :

$$Q_{dif} = h_d \cdot L_v \cdot (\rho_{va} - \rho_{vs}) \cdot c \cdot L \cdot \tau \quad (34)$$

La chaleur adiabatique est la chaleur engendrée par le frottement de l'air sur l'objet :

$$Q_{adh} = h_c \cdot r \cdot \frac{U^2}{2 \cdot c_{p,a}} \cdot c \cdot L \cdot \tau \quad (35)$$

La chaleur cinétique est libérée par le changement de vitesse des gouttelettes d'eau en surfusion entre la frontière de la couche limite et la surface de l'objet :

$$Q_{kin} = \beta_0 \cdot LWC \cdot U \cdot \frac{U^2}{2} \cdot c \cdot L \cdot \tau \quad (36)$$

La similitude des teneurs en eau liquide est respectée en régime humide lorsque les fractions solides sont identiques :

$$f = \frac{c_{p,w}}{L_f} \cdot \left(\phi + \frac{\theta}{b} \right) \quad (37)$$

En régime sec, c'est l'égalité des températures de surface (lorsque le profil n'est pas chauffé) qui assure la similitude de la teneur en eau liquide :

$$T_s = \frac{b \cdot \phi + \theta}{1 + b} \quad (38)$$

Puisque la condition de similitude pour la vitesse et pour la teneur en eau liquide est différente selon le régime d'accrétion, il est impossible de faire un calcul correct si le régime d'accrétion change au cours de l'évènement. Dans ce cas il deviendrait difficile de faire une bonne interprétation des résultats. Les conditions expérimentales doivent donc exclure ce cas.

Ces équations sont combinées dans le logiciel de mise à l'échelle et résolues par une procédure numérique se basant sur la méthode de Gauss-Seidel et permettant d'approximer la solution du système d'équations. L'interface du logiciel de similitude est présentée à la Figure 3-2.

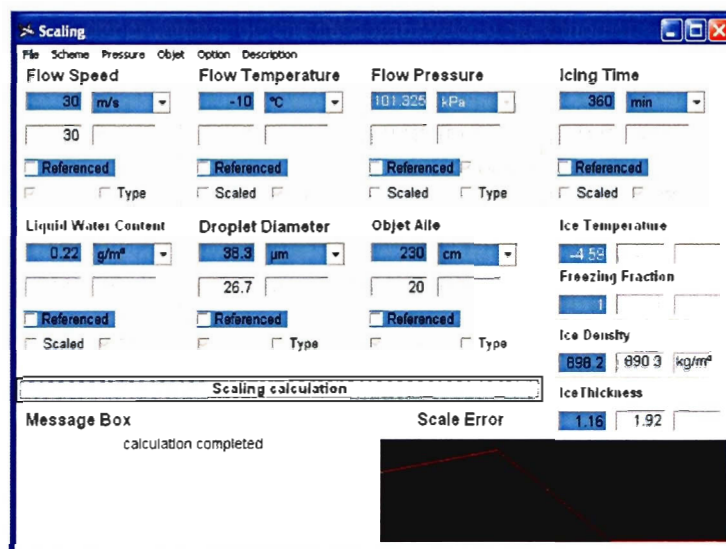


Figure 3-2. Interface du logiciel de mise à l'échelle.

Le résultat pour les simulations en soufflerie est donné au Tableau 3-4. La teneur en eau liquide mesurée sur la station de mesure de Murdochville est considérée comme élevée pour une mesure au sol, l'évènement de givrage simulé dans la soufflerie est donc sévère. Dans la soufflerie, MVD est limité à 27 μm en raison du type de gicleurs utilisé.

Tableau 3-4. Conditions de givrage mises à l'échelle.

LWC (g/m^3)	MVD (μm)	U_∞ (m/s)	α ($^\circ$)	c (m)
0.4	26.7	8	12	0.2

L'angle d'attaque de 12° correspond à l'angle du coefficient de puissance maximal du profil NACA 63 415 (voir section 2.1.1). La valeur de 0.2 m est la corde maximale qu'il est possible de prendre pour le profil dans la section d'essai utilisée, de manière à avoir un écoulement non perturbé par la présence du profil au niveau des parois supérieure et inférieure.

Pour définir des lois de similitude pour le système de chauffage, les variables de similitude qui ont été utilisées pour le givrage et les dimensions du profil sont utilisées. La mise à l'échelle est réalisée d'après l'hypothèse que seules ces variables, si elles participent aux lois de chauffage et au dimensionnement du système de chauffage, sont des variables de similitude. La section 4.4 détaille ce raisonnement.

3.1.4 Conditions de chauffage

Les conditions de chauffage, c'est-à-dire les constantes qui interviennent dans la loi de commande de la puissance et en particulier la constante h_1 , nommée coefficient de chauffage, sont calculées pour chaque essai en fonction des paramètres de l'écoulement qui varient, à savoir les nombres de Reynolds et de Stanton.

Pour chaque position radiale sur la pale, la vitesse relative simulée dans la soufflerie est différente. Par conséquent le nombre de Reynolds varie pour chaque test, de même que le coefficient de transfert de chaleur utilisé pour calculer la puissance nécessaire au dégivrage. Les valeurs des nombres de Reynolds et des coefficients de transfert de chaleur par convection correspondants sont donnés au Tableau 3-5 (voir section 2.3.3). Compte tenu du nombre de Reynolds calculé ($<10^6$), l'écoulement est en régime laminaire.

Tableau 3-5. Valeur du coefficient de transfert convectif pour les différentes vitesses.

U_{rel} (m/s)	Re	C_f	St	h_{cv} (W/m ² /K)
				(Plaque plane)
20	320 958	0.0046	0.0023	61.8599
30	481 437	0.0042	0.0021	85.5623
40	641 916	0.0040	0.0020	107.7043

Pour définir l'intensité de chauffage nécessaire, une analogie avec le transfert de chaleur par convection est réalisée. La valeur moyenne du coefficient de transfert de chaleur convectif est présentée en fonction de la vitesse dans la soufflerie à la Figure 3-3. Elle est estimée en faisant l'hypothèse d'une plaque plane : la vitesse à la frontière de la couche limite correspond à la vitesse de l'écoulement non perturbé et le transfert de chaleur est le même sur toute la surface du profil. La courbe a pour équation une fonction puissance :

$$h_1 = 5.631 \cdot U_{rel}^{0.8} \quad (39)$$

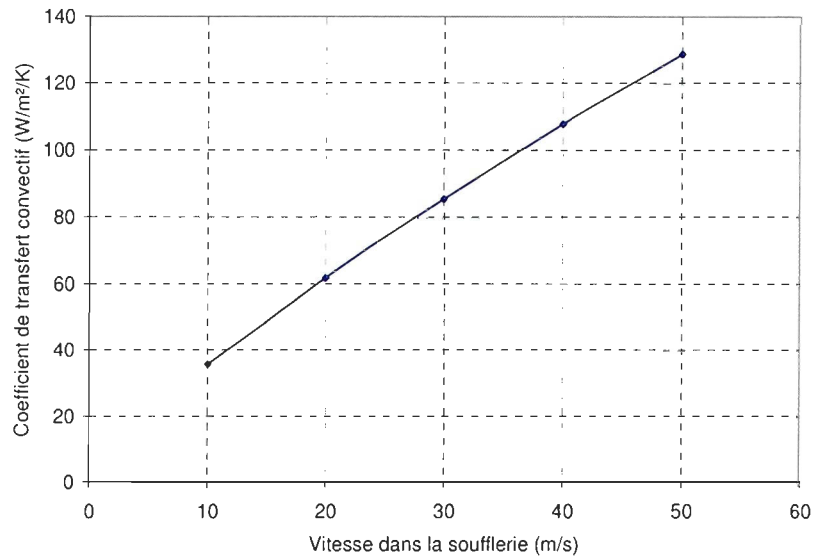


Figure 3-3. Coefficient de transfert de chaleur convectif en fonction de la vitesse.

Avec l'augmentation de la vitesse du vent, le coefficient de transfert de chaleur augmente en raison de l'augmentation des pertes calorifiques, surtout pour les éléments chauffants du bord d'attaque. L'équation utilisée dans le programme de contrôle, lors de la première série de tests, pour calculer la puissance nécessaire est :

$$P = h_1 \cdot A \cdot (T_c - T_s) \quad (40)$$

La température cible T_c de chaque élément, qui est la température que le système doit atteindre au niveau du thermocouple, a été choisie de façon à obtenir le meilleur dégivrage possible à la surface de l'élément pour chaque test. Les essais réalisés et les valeurs des différents paramètres utilisés pour calculer la puissance de chauffage sont détaillés à la section suivante.

3.1.5 Conditions expérimentales

La numérotation des tests est de la forme X-Y-Z. X correspond à la vitesse du vent dans la soufflerie, 1 correspondant à 20 m/s, 2 à 30 m/s et 3 à 40 m/s. Y indique la température de l'air, 3.5 correspond à -3.5 °C. Enfin, Z est le numéro de l'essai. Par exemple, l'essai 2-4.5-3 est le troisième essai effectué à 20 m/s et -4.5 °C.

Deux séries de tests ont été effectuées. Les phénomènes sont simulés sans activer le système de dégivrage, pour pouvoir déterminer la répartition du givre (localisation, poids, impact) sur le profil. Puis le dégivrage est simulé dans ces conditions pour pouvoir observer la réaction du système de dégivrage. Une première série de tests est réalisée dans le but de vérifier le fonctionnement du système et d'optimiser les paramètres de chauffage. Cette série de tests est répertoriée en Annexe E. Seuls les tests pertinents, c'est à dire apportant une valeur ajoutée à l'analyse du système, sont mentionnés dans ce chapitre. Une deuxième série de tests a eu lieu par la suite. En tenant compte des résultats de la première série, certains paramètres, comme le coefficient de transfert de chaleur, ont pu être optimisés. Les conditions expérimentales pour ces tests, correspondant aux trois positions radiales sur la pale du Tableau 3-3 sont présentées aux Tableau 3-6 et Tableau 3-7. L'accumulation de glace dans la soufflerie est réalisée sans puis avec le dégivrage.

Tableau 3-6. Conditions expérimentales pour la deuxième série de tests (dégivrage).

N° Essai	Vitesse dans la zone d'essai (m/s)	Température théorique dans la soufflerie (°C)	Durée du test	Température réelle moyenne dans la soufflerie (°C)	Écart type	Écart type relatif des températures	Conditions de dégivrage		
							hI (W/po ² /K)	Tc (°C)	Tc (°C)
								(BF)	(BA)
1-10-1	20	-10	14'18"	-10,22	0,16	-0,02	0,6	1	1
1-10-2	20	-10	14'18"	-10,52	0,38	-0,04	0,6	1	1
1-10-3	20	-10	14'18"	-10,79	0,32	-0,03	0,6	1	5
2-10-1	30	-10	16'54"	-10,53	0,36	-0,03	0,9	1	1
2-10-2	30	-10	16'54"	-10,98	0,37	-0,03	0,8	1	1
2-10-3	30	-10	16'54"	-11,05	0,31	-0,03	0,9	1	10
3-10-1	40	-10	21'42"	-10,33	0,45	-0,04	1,1	1	1
3-10-2	40	-10	21'42"	-10,72	0,45	-0,04	1,1	1	10
3-10-3	40	-10	21'42"	-10,43	0,44	-0,04	1,5	1	15
3-10-4	40	-10	21'42"	-9,86	0,46	-0,05	1,5	1	15

* BF = Bord de Fuite ; BA = Bord d'Attaque

Tableau 3-7. Conditions expérimentales pour la deuxième série de tests (givrage).

N° Essai	Vitesse dans la zone d'essai (m/s)	Température théorique dans la soufflerie (°C)	Durée du test	Température réelle moyenne dans la soufflerie (°C)	Écart type	Écart type relatif des températures
1-10-G1	20	-10	14'18"	-10,76	0,46	-0,043
1-10-G2	20	-10	14'18"	-10,37	0,38	-0,036
2-10-G1	30	-10	16'54"	-10,37	0,41	-0,039
2-10-G2	30	-10	16'54"	-11,32	0,41	-0,036
3-10-G1	40	-10	21'42"	-9,31	0,36	-0,039
3-10-G2	40	-10	21'42"	-10,23	0,43	-0,042

Les conditions de chauffage des essais de la première série de tests ont été estimées grossièrement puis modifiées pour les essais à -10 °C en fonction des formes de glace obtenues.

Après avoir déterminé tous les paramètres expérimentaux et fixé les conditions expérimentales, autant en termes de givrage que de chauffage, plusieurs étalonnages doivent être réalisés.

3.2 Étalonnages

Avant de réaliser les tests, la teneur en eau dans la soufflerie a été étalonnée, ainsi que les thermocouples et l'angle d'attaque, contrôlé par le logiciel Soufflerie 2000. Les détails de la procédure et les résultats des étalonnages sont fournis en Annexe D.

3.3 Essais préliminaires

La première série de tests, réalisée pour différentes températures et vitesses, a pour but d'observer l'impact sur le système de dégivrage de tous les paramètres, environnementaux et intrinsèques au système, afin d'optimiser le chauffage, c'est-à-dire trouver l'équilibre entre l'intensité du chauffage et la suppression du givre à la surface du profil. Cette étude est détaillée dans les sections suivantes (3.4 à 3.10).

3.4 Impact des paramètres de la soufflerie

Les variations de la température enregistrée par les thermocouples, qui concordent avec les variations de température de la soufflerie amènent à s'interroger sur l'impact du matériel expérimental sur les résultats et leur précision.

L'effet du passage de la rampe de gicleurs devant le profil est présenté à la Figure 3-4. Il est le plus visible pour le thermocouple 1 qui se trouve dans la zone d'impact des gouttelettes d'eau en raison de l'angle d'attaque important.

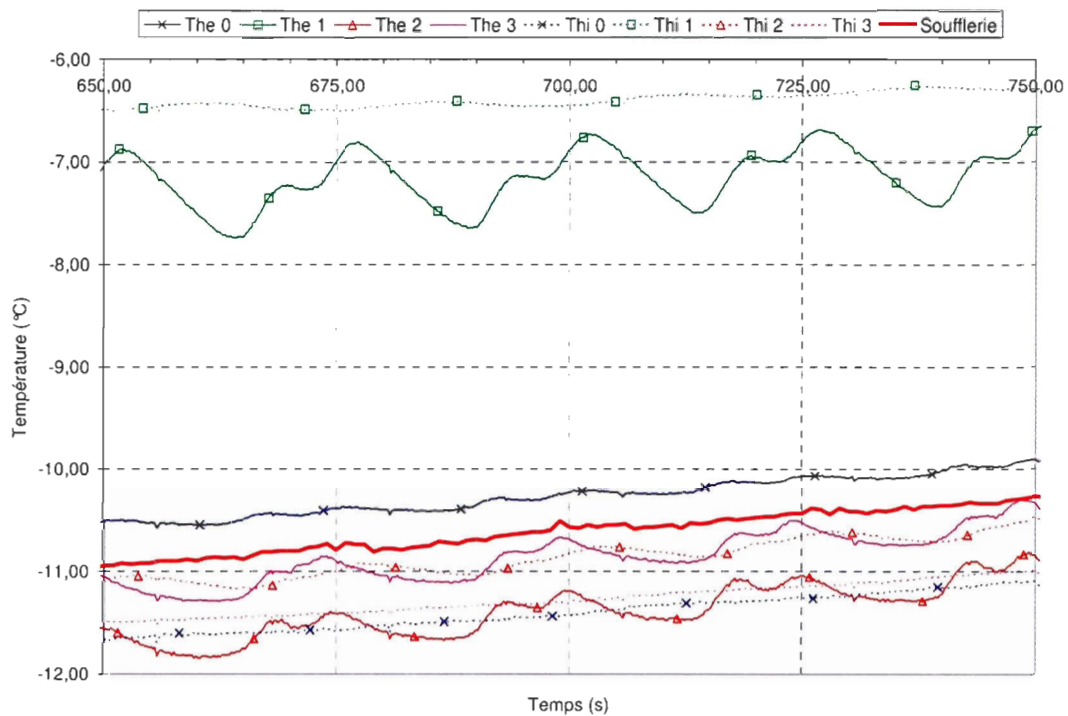


Figure 3-4. Effet de la rampe de gicleurs sur les thermocouples. (Essai 1-10-G1)

La vitesse de la rampe de gicleurs est de 0,08 m/s environs. Un cycle de la rampe dure environs 26 s (± 1 s). Durant cet intervalle, la rampe passe deux fois devant le profil. Lorsque la rampe est au niveau du profil, celui-ci collecte davantage de gouttelettes d'eau et la température de surface augmente en raison de l'énergie libérée par la solidification.

Le contrôle des paramètres de la soufflerie est délicat, en particulier pour la température de l'air. Les variations de la vitesse et de la température de l'air sont présentées pour un essai type (3-3.5-3) à la Figure 3-5.

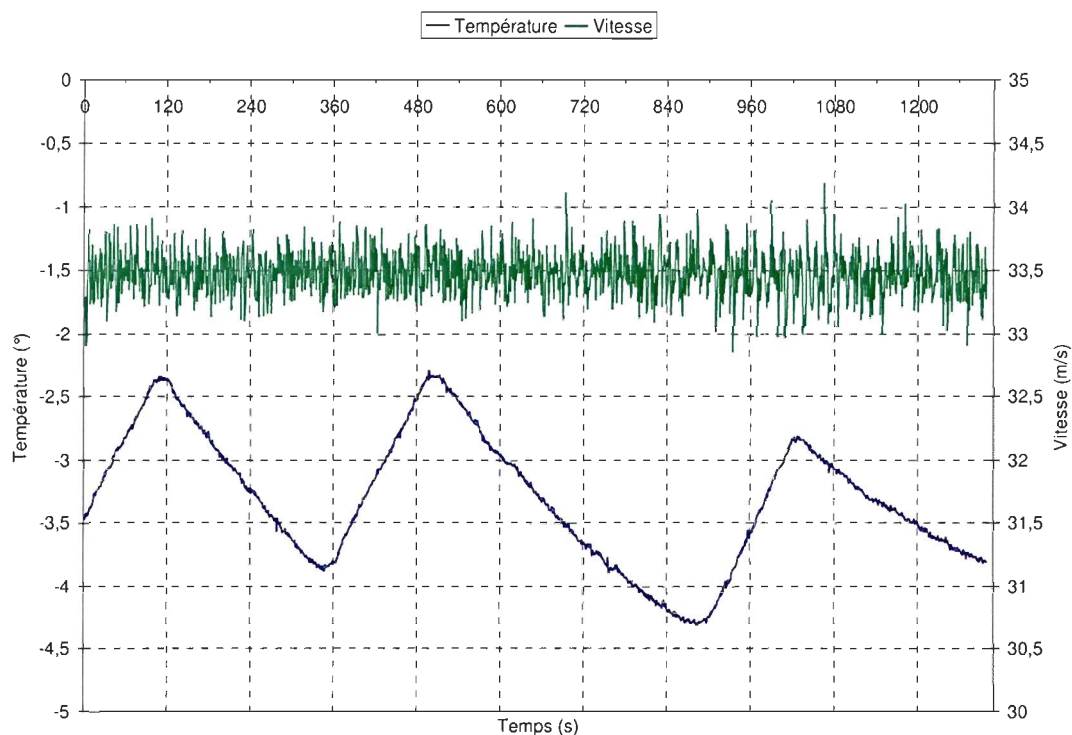


Figure 3-5. Évolution des paramètres de la soufflerie au cours d'un essai. (Essai 3-3.5-3)

La vitesse de l'air est contrôlée à ± 0.75 m/s, les fluctuations sont régulières tout au long de l'essai. La température de l'air est plus délicate à contrôler en raison des perturbations thermiques importantes induites par le moteur, l'environnement de la soufflerie et en raison du temps de réponse du système de refroidissement qui a une inertie importante. Celui-ci est plus sollicité à la fin de l'essai en raison du givre qui s'accumule dans la soufflerie et de la température et humidité de la pièce dans laquelle est utilisée la soufflerie. De plus, la position du capteur de température, à la sortie de l'échangeur, induit un certain délai dans le contrôle de la température de l'air. Les oscillations de la température ont une amplitude importante, qui peut aller jusqu'à ± 1.5 °C de la température théorique visée. Plus la vitesse de l'air est faible, plus l'impact des perturbations extérieures est important et donc la précision de la température de l'air est réduite. De même, moins l'échangeur est sollicité (températures les plus élevées), moins bonne est la précision de la température. La variation de la température est un facteur à prendre en compte dans l'évaluation de

la qualité des résultats de givrage et la consommation de puissance du système de dégivrage. Le système est influencé par ce paramètre qui doit être considéré lors de l'interprétation des résultats. Cependant, lorsque la valeur moyenne de la température est similaire ($\leq 1^\circ\text{C}$) la puissance moyenne consommée est identique (voir section suivante) et les résultats des différents essais peuvent alors être comparés entre eux.

3.5 Reproductibilité des tests

La reproductibilité des essais est une condition essentielle à la valeur scientifique des résultats de l'étude et doit donc être démontrée.

Les variations de température de l'air dans la soufflerie impliquent des variations dans la consommation de puissance du système de dégivrage car la température relevée par les thermocouples est liée à ce paramètre. Il est difficile d'obtenir deux tests avec des conditions de température identiques tout au long de l'essai. La Figure 3-6 présente les conditions de température de l'air dans la soufflerie pour les essais 1-1.5-1 et 1-1.5-2 (à 20 m/s et -1.5°C). Ces tests ont lieu dans les mêmes conditions expérimentales et l'évolution de la température de l'air est considérée similaire pour les deux tests.

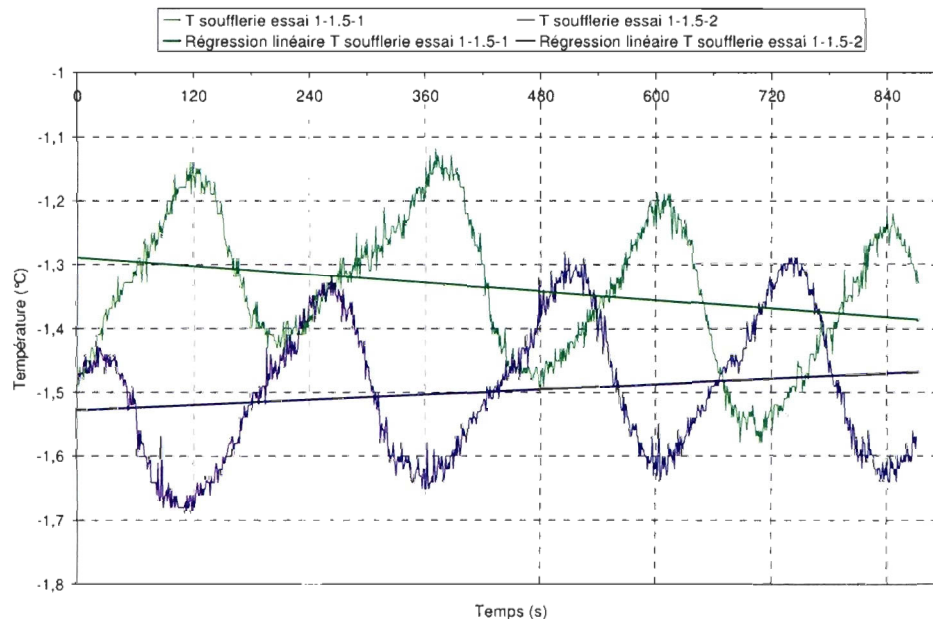


Figure 3-6. Comparaison des conditions expérimentales pour les essais 1-1.5-1 et 1-1.5-2.

À 0.25 °C près, la température moyenne est la même (d'après la régression linéaire visible à la Figure 3-6). La Figure 3-7 illustre l'évolution de la consommation de puissance au cours des essais 1-1.5-1 et 1-1.5-2 (à 20 m/s et -1.5 °C). Les courbes sont tracées à partir des moyennes sur 90 s de la puissance, calculée chaque seconde. Une baisse brutale de la puissance est observée au début de l'essai. En effet, l'impact des gouttelettes à la surface du profil induit une augmentation de la température de surface. La consommation de puissance se stabilise ensuite entre 2 et 3.5 W selon les éléments chauffants, soit 0.22 et 0.38 W/po². La consommation de puissance est similaire lors des deux essais pour chaque élément.

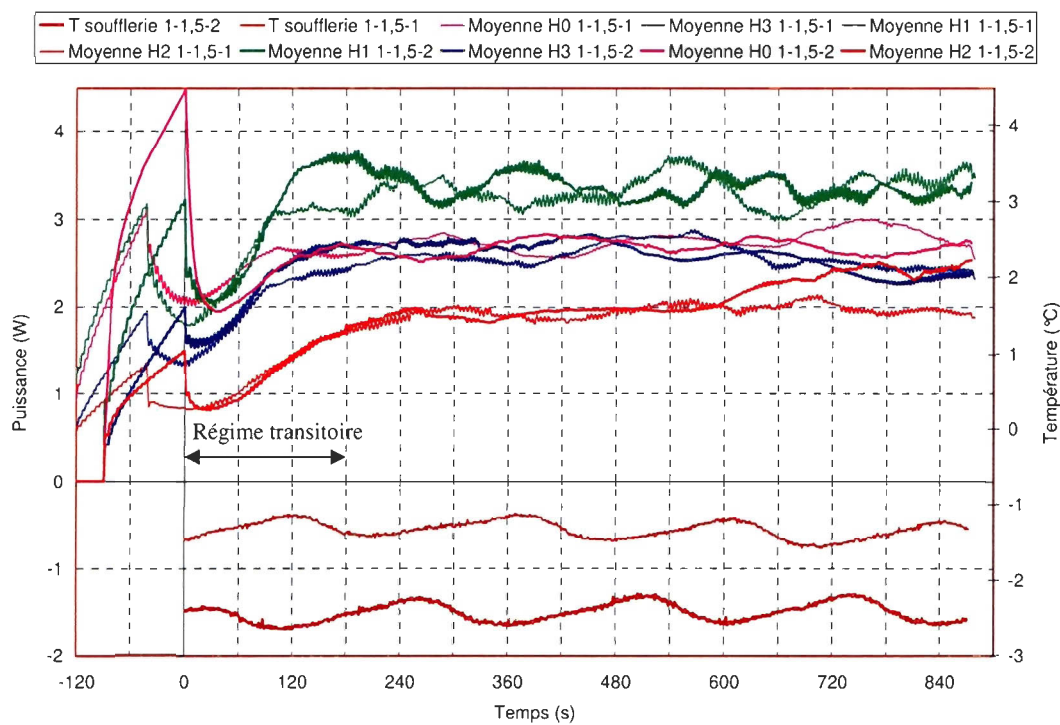


Figure 3-7. Puissance consommée essais 1-1.5-1 et 1-1.5-2.

Les puissances moyennes consommées par les éléments chauffants sont quasiment égales pour les deux tests avec un écart relatif maximum de 8,4 % pour l'élément chauffant 2 (Tableau 3-8). Ces puissances moyennes sont calculées à partir de 180 s après le début du test afin de tenir compte du régime transitoire. Le Tableau 3-8 donne ces valeurs moyennes pour les deux tests présentés ici. La grande similarité des résultats démontre la reproductibilité des tests.

En conclusion, la température moyenne et la puissance moyenne consommée lors de l'essai, calculées à l'issue du régime transitoire, sont des indicateurs fiables de la reproductibilité du test.

Tableau 3-8. Puissance moyenne pour deux essais identiques

Élément chauffant	Puissance moyenne pour l'essai 1-1.5-1 (W)	Puissance moyenne pour l'essai 1-1.5-2 (W)	Ecart relatif (%)
0	2,68	2,74	2,19
3	2,56	2,56	0,00
1	3,34	3,35	0,30
2	2,14	1,96	8,41

3.6 Étude et optimisation du chauffage

L'analyse du système d'un point de vue uniquement théorique est insuffisante pour pouvoir optimiser tous les paramètres. Une étude expérimentale est nécessaire en raison des pertes et des échanges thermiques qui ont lieu avec le milieu extérieur et qui sont difficilement quantifiables par le calcul. L'étude du fonctionnement du système et de sa réponse aux modifications de différents paramètres tels que les paramètres du chauffage est détaillée dans cette section.

Dans un premier temps, l'évolution de la puissance consommée en fonction du temps est observée. Le fonctionnement du processus de calcul de la puissance et le résultat qui en découle sur la température enregistrée sont examinés. L'optimisation de la fréquence d'échantillonnage du programme est étudiée et la réactivité du système aux variations de températures de l'écoulement est constatée. Une optimisation du coefficient de chauffage h_i est proposée et enfin l'impact de la consigne de température T_c est étudié.

3.6.1 Calcul de la puissance

L'équation de calcul de la puissance nécessaire au chauffage, utilisée lors des essais préliminaires, est rappelée :

$$P = h_i \cdot A \cdot (T_c - T_s) \quad (41)$$

L'absence de constante dans l'équation induit de grandes variations dans la puissance fournie. En effet, l'alimentation de puissance est coupée dès que le thermocouple enregistre une température

supérieure ou égale à la température cible T_c de 2 °C dans le cas présent. L'évolution de la puissance ainsi produite est présentée à la Figure 3-8, où H1 indique la puissance instantanée fournie à l'élément chauffant 1 et The 1 représente la température du thermocouple utilisé pour la commande. En pointillés est illustrée la température cible.

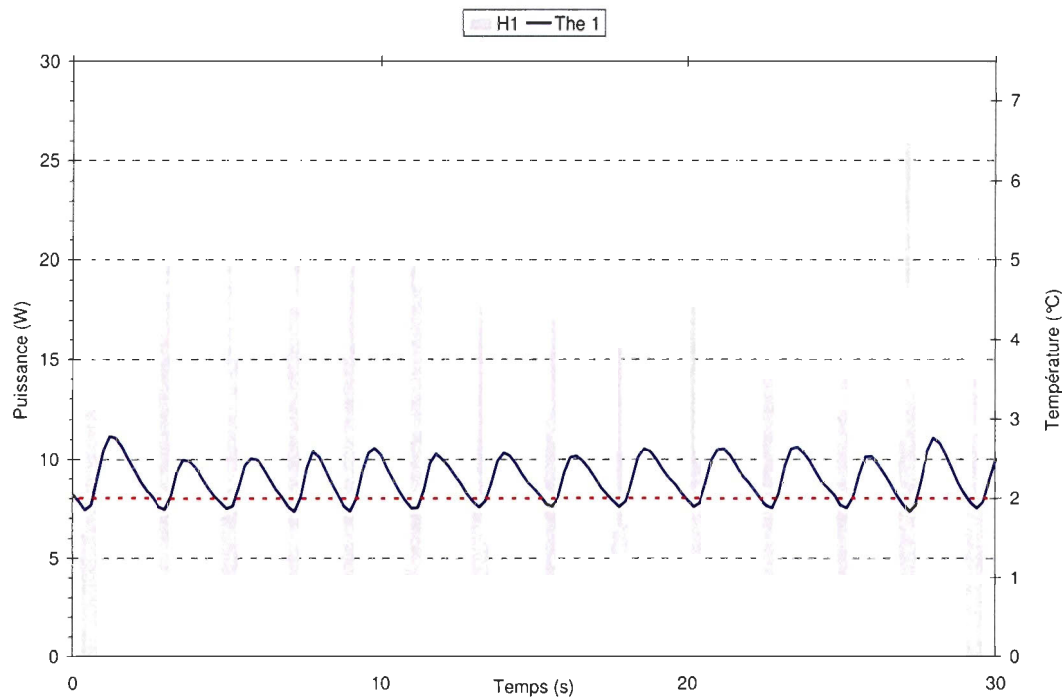


Figure 3-8. Détail des variations de puissance lors de l'essai 3-0-3.

Lorsque la température du thermocouple dépasse la température cible, la différence $T_c - T_s$ devient négative et la puissance envoyée devient nulle. Elle reste nulle jusqu'à la prochaine itération de calcul qui enregistrera une différence positive. Alors, la puissance envoyée est calculée en fonction de ce nouvel écart de température et reste constante durant toute l'itération. La durée d'une itération de calcul devient alors un facteur important de la consommation de puissance car la puissance peut être ajustée plus précisément si elle est calculée plus fréquemment.

3.6.2 Fréquence d'échantillonnage et réactivité du système

La température relevée par chaque thermocouple est enregistrée dans un fichier par le programme de contrôle, de même que la puissance nécessaire calculée par le programme (voir Chapitre 2). La fréquence d'échantillonnage a été modifiée pour certains tests afin de déterminer l'impact de ce

paramètre sur les résultats de consommation de puissance. Pour les essais 1-1.5-1 et 1-1.5-2, la fréquence d'échantillonnage et d'enregistrement est de 1 s tandis que pour le test 1-1.5-3 elle est de 0.2 s. La Figure 3-9 présente l'évolution de la température de l'air dans la soufflerie pour les trois essais.

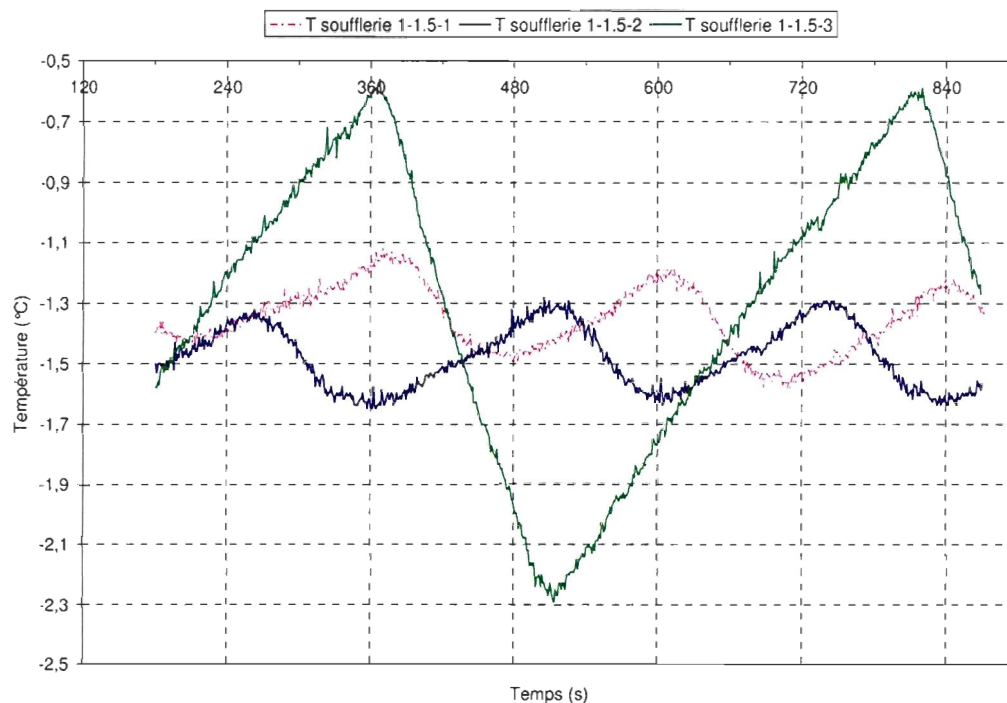


Figure 3-9. Évolution de la température de l'air pour la comparaison des puissances.

L'amplitude des variations de la température de l'air est 3 à 4 fois plus importante pour l'essai 1-1.5-3 que pour les deux autres essais. Les résultats sont donc moins facilement comparables mais la température moyenne reste similaire, la puissance moyenne consommée pour tout le test reste donc un bon indicateur de comparaison entre ces essais (voir section 3.5 sur la reproductibilité des tests).

Les augmentations de consommation de puissance liées aux diminutions de la température de l'air sont plus visibles lorsque l'amplitude des variations de cette température est importante. La consommation de puissance diminue, comme illustré à la Figure 3-10, lorsque la température de l'air augmente. Ainsi la qualité du dégivrage est maintenue constante au cours de l'évènement de givrage et les pertes énergétiques lorsque la température de l'air augmente sont évitées par la réduction de la puissance de chauffage.

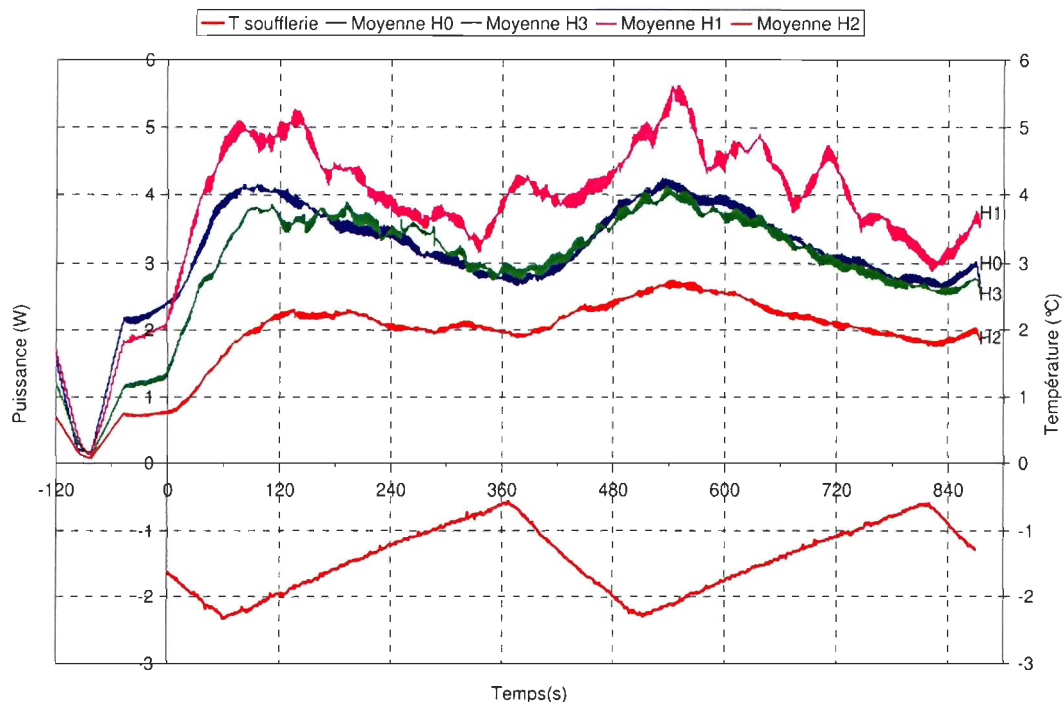


Figure 3-10. Consommation de puissance essai 1-1.5-3.

Le Tableau 3-9 permet de comparer la consommation moyenne de puissance pour les trois essais à 20 m/s et -1.5 °C. L'essai 1-1.5-3 est celui qui a consommé le plus d'énergie pour le dégivrage devant l'essai 1-1.5-2 puis 1-1.5-1, alors que les conditions de chauffage sont identiques pour ces trois essais. La température moyenne de l'air lors des essais comparés ici est la même à 0.16 °C près. L'essai 1-1.5-1 s'est déroulé à une température de -1.34 °C en moyenne, l'essai 1-1.5-2 à -1.50 °C et l'essai 1-1.5-3 à -1.43 °C. L'écart relatif de consommation de puissance est calculé entre la consommation de l'essai 1-1.5-3 et la moyenne des consommations des essais 1-1.5-1 et 1-1.5-2 afin de comparer l'augmentation lorsque la fréquence d'échantillonnage augmente.

Tableau 3-9. Comparaison des puissances consommées en fonction de la fréquence du calcul.

Élément chauffant	Puissance moyenne pour l'essai 1-1.5-1 (W)	Puissance moyenne pour l'essai 1-1.5-2 (W)	Puissance moyenne pour l'essai 1-1.5-3 (W)	Ecart relatif (%)
0	2,68	2,74	3,24	16,36
3	2,56	2,56	3,23	20,74
1	3,34	3,35	4,05	17,41
2	2,14	1,96	2,18	5,96
Fréquence de Calcul (s)	1	1	0,2	

La consommation de puissance augmente le plus pour l'élément chauffant 3. La consommation énergétique augmente de 17 % environ pour les éléments chauffants du bord d'attaque (n° 0 et 1) ce qui est raisonnable étant donné l'amélioration de la température de surface (voir paragraphe suivant). La Figure 3-11 illustre les résultats énumérés au Tableau 3-9. L'histogramme permet de comparer visuellement les trois consommations de puissance pour chaque élément.

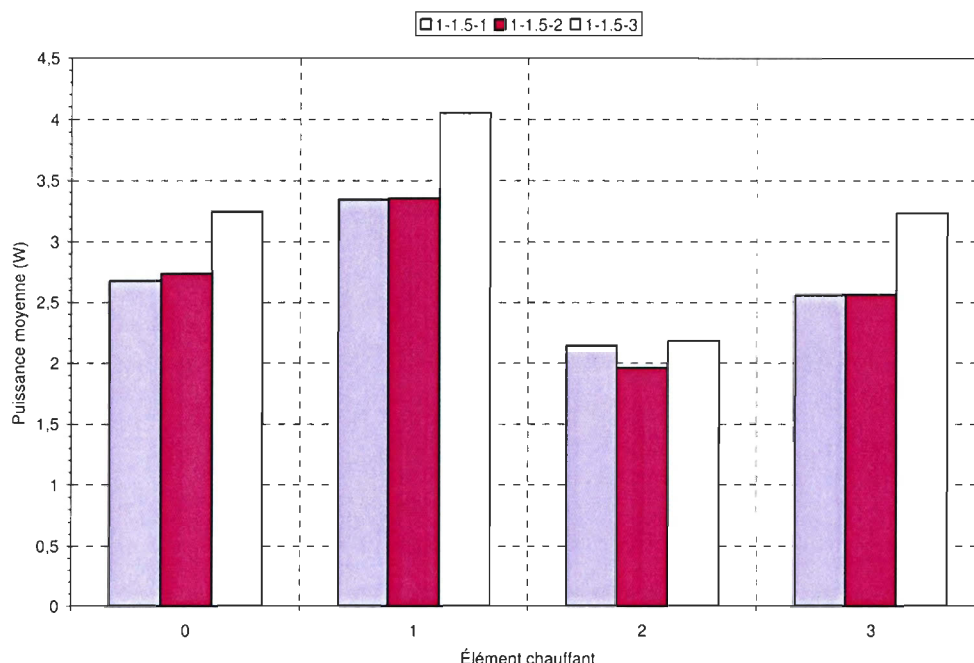


Figure 3-11. Histogramme des puissances consommées pour chaque élément.

La puissance moyenne consommée est plus importante dans le cas où le calcul est effectué toutes les 0.2 s (essai 1-1.5-3) que dans le cas où il est effectué toutes les secondes (essais 1-1.5-1 et 1-1.5-2). Ceci est dû à la température de surface qui est globalement plus élevée (température moyenne de 2 °C) dans le cas où l'échantillonnage est de 0.2s que dans le cas où l'échantillonnage est de 1 s (température moyenne de 1.78 °C). Ces résultats sont visibles à la Figure 3-12.

L'augmentation de la puissance consommée s'accompagne d'une amélioration de la température de surface moyenne qui oscille autour de la valeur cible de 2 °C pour l'essai 1-1.5-3 alors qu'elle oscillait autour de 1.78 °C pour les essais 1-1.5-1 et 1-1.5-2. La température moyenne de surface a augmenté de 11 % et la consommation de puissance de 17 % en moyenne sur le bord d'attaque.

L'utilisation d'une fréquence d'échantillonnage plus élevée rend le système plus rapide et plus précis, mais il consomme également plus d'énergie. Les amplitudes des oscillations de la température de surface sont moindres et la température de surface est globalement plus élevée, ce qui explique la consommation de puissance plus importante. La Figure 3-12 présente ces résultats. À chaque itération, la température est mesurée pour les 2 essais et donne la courbe en continu sur la figure. La puissance nécessaire est calculée à partir de cette valeur et pendant toute l'itération une puissance constante est envoyée dans l'élément chauffant, donnant les deux courbes discontinues sur la figure.

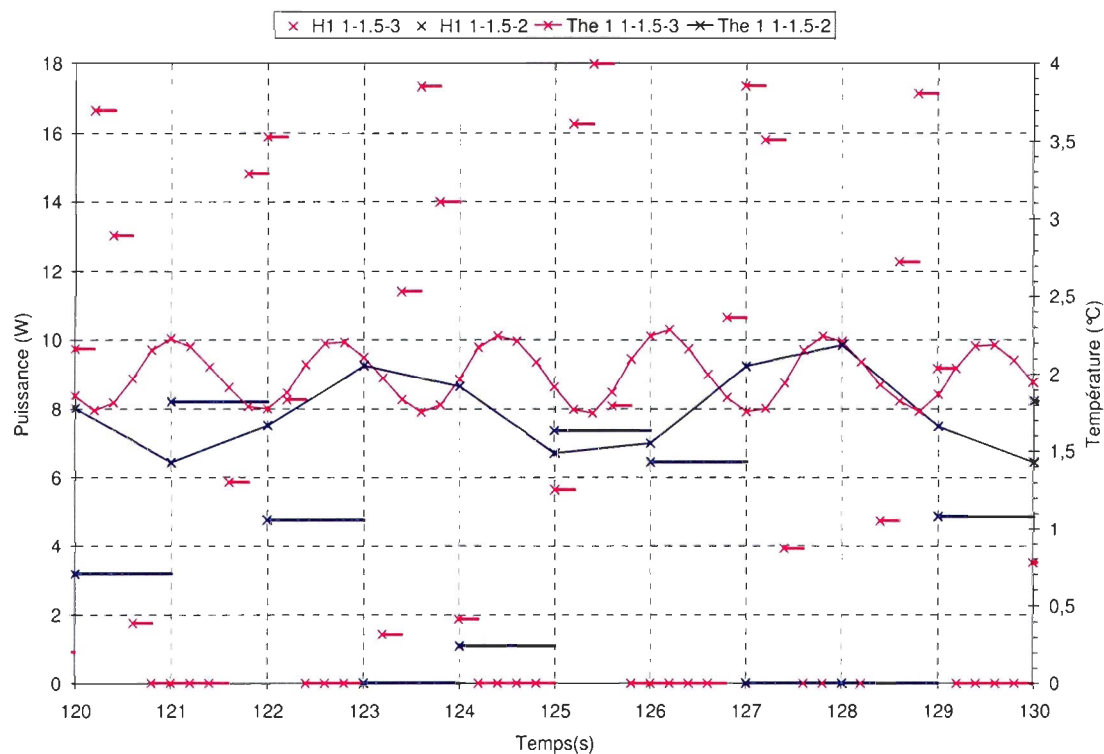


Figure 3-12. Comparaison de l'évolution de la température à fréquence de contrôle variable.

La Figure 3-13 donne l'exemple du thermocouple 1 sur la surface externe du profil. Les variations de la température sont plus régulières et mieux centrées sur la valeur cible de 2 °C lorsque la puissance est recalculée toutes les 0.2 s.

La température minimale est très stable et la température maximale atteinte par le thermocouple oscille avec une amplitude plus faible. Le contrôle de la température est finalement plus précis.

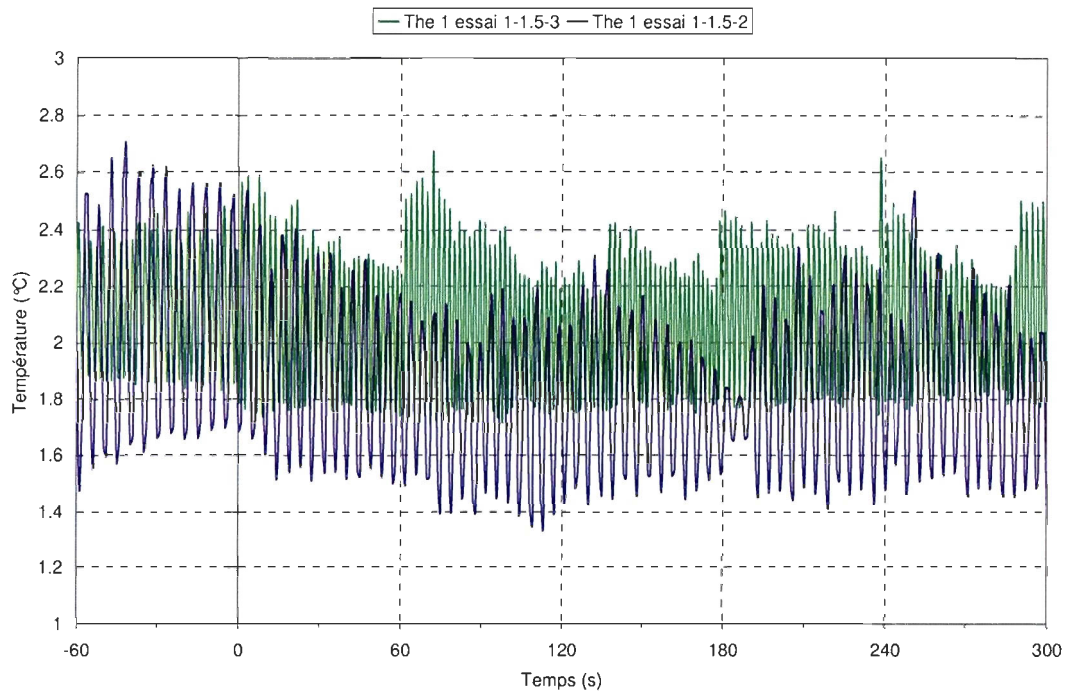


Figure 3-13. Évolution de la température de surface selon la fréquence d'échantillonnage.

L'optimisation de la fréquence d'échantillonnage repose donc sur un compromis entre la précision du contrôle de la température et la consommation de puissance maximale acceptable pour l'évènement de givrage.

3.6.3 Optimisation du coefficient de transfert de chaleur h_1

Le coefficient de transfert de chaleur a été estimé en faisant l'hypothèse d'une plaque plane (voir section 3.1.4). Dans la pratique, il s'est avéré que la valeur utilisée pour h_1 est différente de celle réellement nécessaire. Des tests sont donc effectués avec des valeurs de h_1 différentes afin d'apprécier la valeur réellement appropriée au dégivrage.

Lors de l'essai 1-1.5-3, $h_1=0.9$ W/K alors que pour les essais 1-1.5-4 et 1-1.5-5, $h_1=0.1$ W/K et $h_1=0.05$ W/K respectivement. La consigne du système (Température cible T_c) est fixée à $+2$ °C lors de tous les essais. La puissance consommée diminue avec la diminution de la valeur de h_1 car la puissance est proportionnelle à h_1 .

Le Tableau 3-10 présente la puissance moyenne consommée par chaque élément chauffant lors des essais à $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lorsque h_1 est modifié. Cette moyenne est calculée à partir de la fin du régime transitoire estimé à 180 s. La diminution de la puissance consommée est très claire. Le dégivrage reste cependant tout à fait efficace puisqu'aucune accumulation de givre n'est observée à l'issue de chacun des essais.

Tableau 3-10. Puissance moyenne consommée à $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Élément chauffant	Puissance moyenne pour l'essai 1-1.5-3 (W)	Puissance moyenne pour l'essai 1-1.5-4 (W)	Puissance moyenne pour l'essai 1-1.5-5 (W)
0	3,24	2,30	1,94
3	3,23	2,37	2,03
1	4,05	2,97	2,77
2	2,18	1,73	1,85
Valeur de h_1	0,9	0,1	0,05

La Figure 3-14 présente les différences entre les puissances moyennes consommées par chaque élément au cours des essais à $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lorsque h_1 varie. Le constat réalisé d'après le Tableau 3-10 est ainsi illustré.

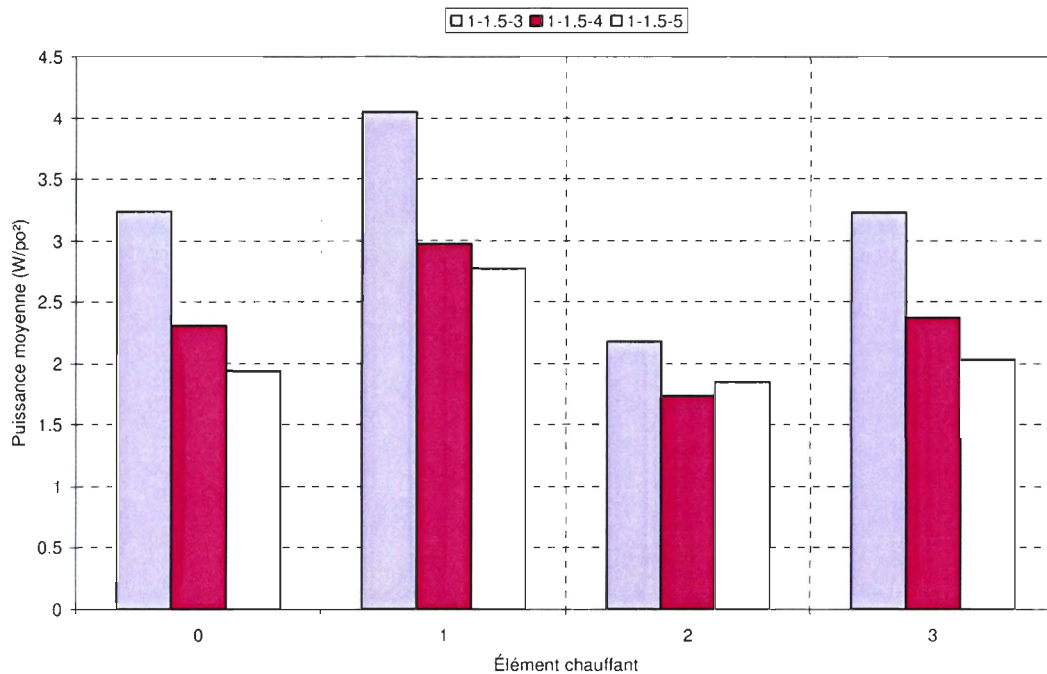


Figure 3-14. Puissance moyenne consommée par les essais à $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à h_1 variable.

La valeur du coefficient de transfert de chaleur est reliée aux pics de puissance qui apparaissent au cours du dégivrage car h_1 agit comme un coefficient multiplicateur pour la puissance. Des calculs plus poussés concernant ce paramètre sont réalisés au Chapitre 4. Les résultats obtenus par le logiciel LIMAicing2D sont détaillés car les hypothèses de plaque plane et de transfert thermique par convection uniquement, considérées pour cette étude devront subir une deuxième étude pour optimiser davantage le dégivrage.

3.6.4 Impact de la température cible T_c sur le chauffage

Les essais 2-4.5-4 et 2-4.5-5 ont lieu dans les mêmes conditions (30 m/s et $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), exception faite de la valeur de la température cible qui vaut $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour l'essai 2-4.5-4 et $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour l'essai 2-4.5-5. La Figure 3-15 présente les variations de la puissance consommée par les éléments chauffants H0 et H1 lors des deux essais. La puissance consommée lorsque la température cible est augmentée est plus importante, principalement en début d'essai. Par la suite, la différence de consommation de puissance entre les deux essais diminue et devient nulle en fin d'essai.

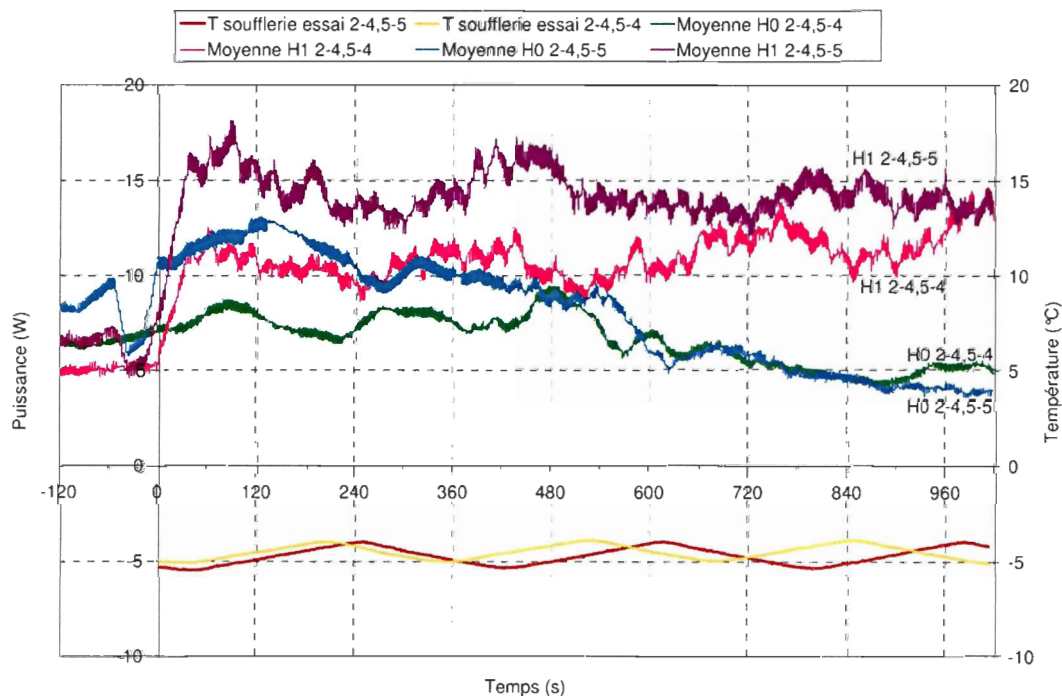


Figure 3-15. Puissance consommée pour H0 et H1.

La Figure 3-16 illustre l'impact de la température cible T_c sur la température réelle de surface Th_e .

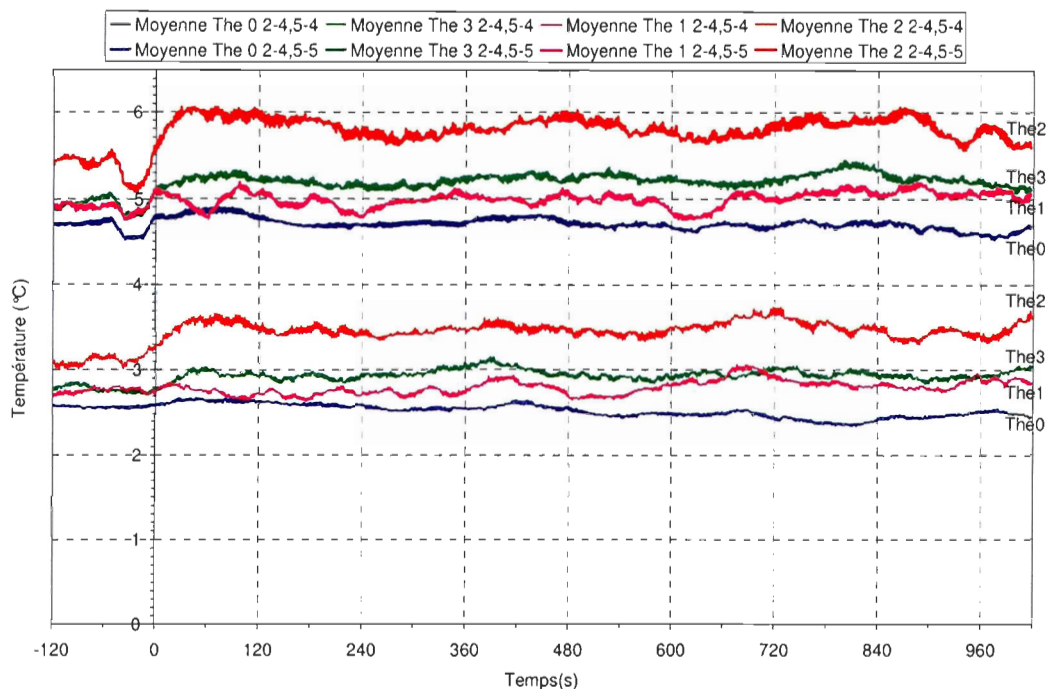


Figure 3-16. Température de surface essais 2-4.5-4 et 2-4.5-5.

Un écart entre les températures des deux essais est très visible. Il reste constant au cours de l'essai alors que la puissance consommée diminue, comme remarqué sur la Figure 3-15. Le Tableau 3-11 donne les puissances moyennes ainsi que l'écart relatif pour chaque élément lors des deux essais étudiés ici.

Tableau 3-11. Puissance moyenne consommée par les essais 2-4.5-4 et 2-4.5-5.

Élément chauffant	Puissance moyenne pour l'essai 2-4.5-4 (W)	Puissance moyenne pour l'essai 2-4.5-5 (W)	Ecart relatif (%)
0	6,4	7,34	12,81
1	11,07	14,16	21,82
2	6,54	9,25	29,30
3	8,24	11,56	28,72

La puissance moyenne consommée est plus importante lorsque la température cible est plus élevée. Une augmentation de 2°C induit une variation de la consommation de puissance de 12,8 à 28,7 % selon les éléments chauffants. La puissance est calculée en fonction de la température à atteindre qui est donc un paramètre important pour l'optimisation de la consommation énergétique du système.

L'optimisation du chauffage réalisée dans cette section permet de comprendre les réactions et la réponse du système aux modifications des paramètres de chauffage pour mieux le rentabiliser et éviter les pertes énergétiques.

3.7 Analyse des variations de la température

Les enregistrements de température réalisés à l'aide des thermocouples sont analysés afin d'observer tous les phénomènes thermiques visibles, de constater les différences entre les divers thermocouples selon leur positionnement et d'étudier le processus de chauffage lors du dégivrage.

Sur les graphiques, la température de l'air dans la soufflerie est représentée en gras, les températures des thermocouples sont tracées à partir de moyennes, lorsqu'indiqué en légende, afin d'améliorer la lisibilité des figures.

Les essais à 0°C sont assez délicats à réaliser en raison de la plage de précision de la température de l'air dans la soufflerie. La température moyenne des essais peut donc être aléatoirement au dessus ou au dessous de la température de congélation, ce qui est gênant pour interpréter l'accumulation de glace sur le profil. L'accumulation de glace est nulle pour les essais à 20 et 30 m/s à 0°C. À 40 m/s, un léger dépôt de glace est visible sur le profil, principalement sur le bord d'attaque (photos à la section 3.8).

Les problèmes d'isolation des fils des thermocouples ont rendu les enregistrements des essais de givrage inexploitable. L'essai de givrage à 40 m/s a été répété (3-0-G1) après l'isolation des fils car il est le plus intéressant, en raison de la présence de glace. La Figure 3-17 présente les températures de surface de la zone centrale du profil mesurées lors de l'essai 3-0-G1. La température de surface du profil suit les variations de température de la soufflerie.

La Figure 3-18 présente les températures mesurées par les thermocouples situés sur la face interne de la zone centrale du profil. La température suit les mêmes évolutions que pour les thermocouples externes avec une amplitude réduite. Au début de l'essai, une cassure dans la courbe est visible lors de l'impact des premières gouttelettes sur le profil.

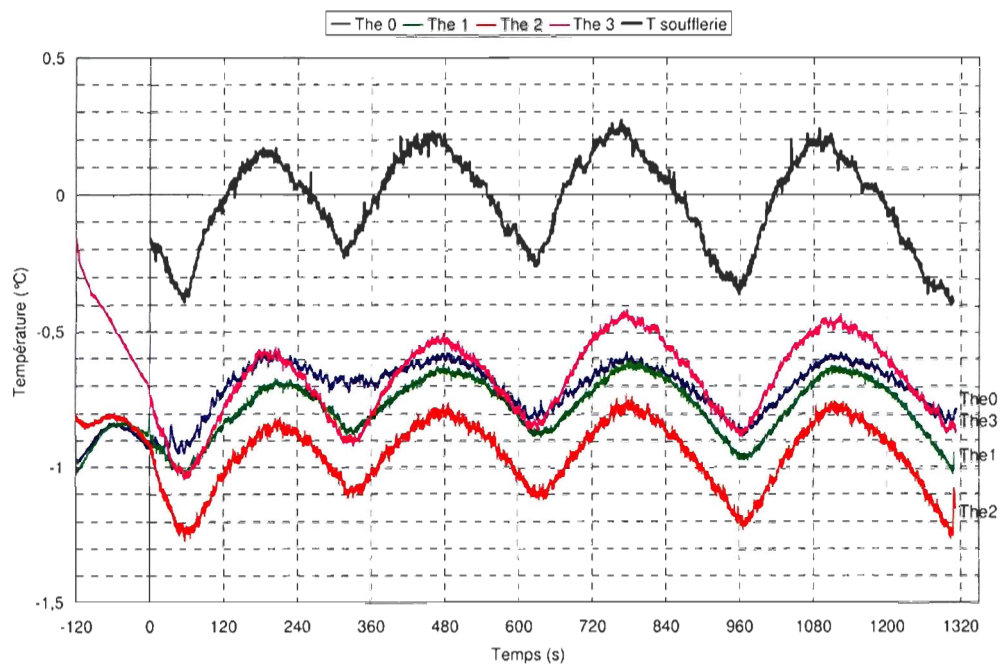


Figure 3-17. Température mesurée par les thermocouples externes lors de l'essai 3-0-G1.

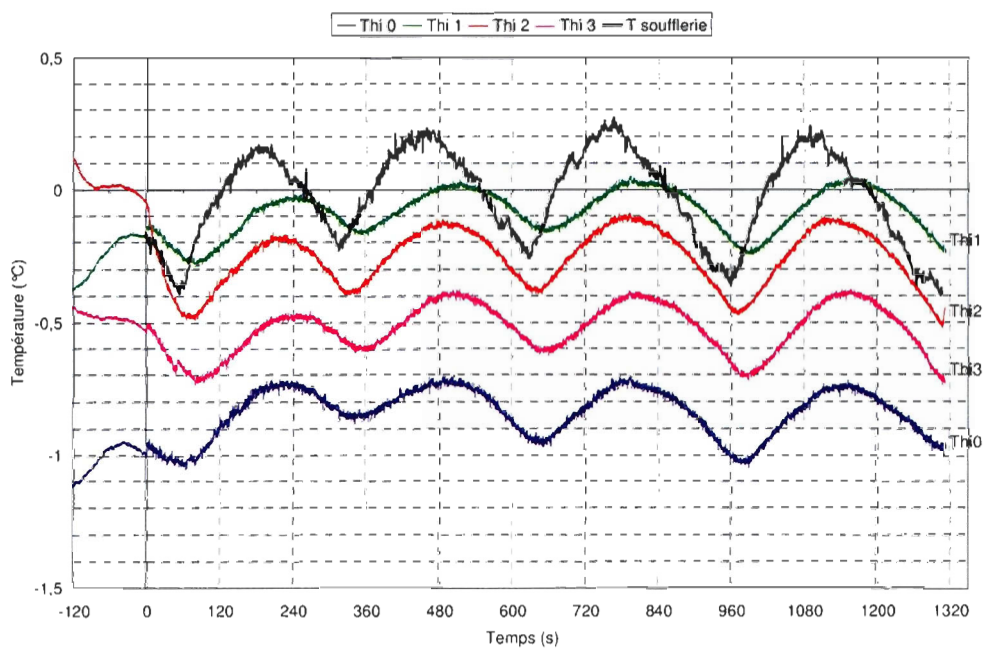


Figure 3-18. Température mesurée par les thermocouples internes lors de l'essai 3-0-G1.

Les différences entre les températures des faces externes et internes sont visibles sur les Figure 3-19 et Figure 3-20 lorsque l'on compare les résultats de l'extrados puis de l'intrados. Les courbes sont obtenues à partir de moyennes mobiles sur 60 s.

La surface extérieure du profil au niveau du thermocouple 0 est à une température supérieure de 0.05 °C à 0.17 °C à la surface interne. Pour les autres thermocouples, la température interne est plus élevée que la température externe de 0.6 °C à 0.7 °C en moyenne. Le thermocouple 0 est le seul à relever une température plus faible à l'intérieur du profil qu'à l'extérieur. Ceci peut s'expliquer par le positionnement du thermocouple externe, soumis à l'impact direct des gouttelettes d'eau et exposé au vent. Le thermocouple interne relève une température de surface influencée par la température de l'air à l'intérieur de la cavité du profil, alors que le thermocouple externe, isolé par la glace accumulée, relève une température influencée par l'eau et la glace présentes. De plus, les thermocouples internes 1 et 2 enregistrent des températures comprises entre 0 et -0.5 °C alors que les thermocouples internes 0 et 3 (sur l'extrados) enregistrent des températures plus faibles et plus proches de celles des thermocouples extérieurs. La glace qui s'accumule augmente la turbulence de l'écoulement aux abords de la couche limite, ce qui perturbe les échanges thermiques, surtout sur l'extrados.

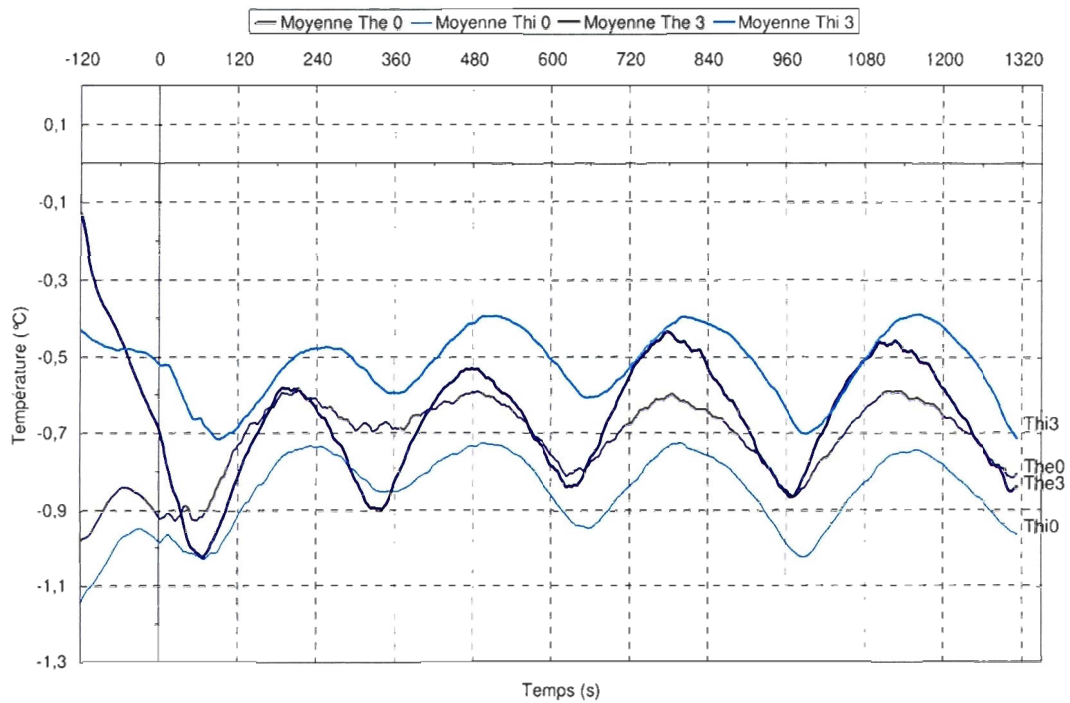


Figure 3-19. Températures mesurées par les thermocouples de l'extrados (0 et 3).

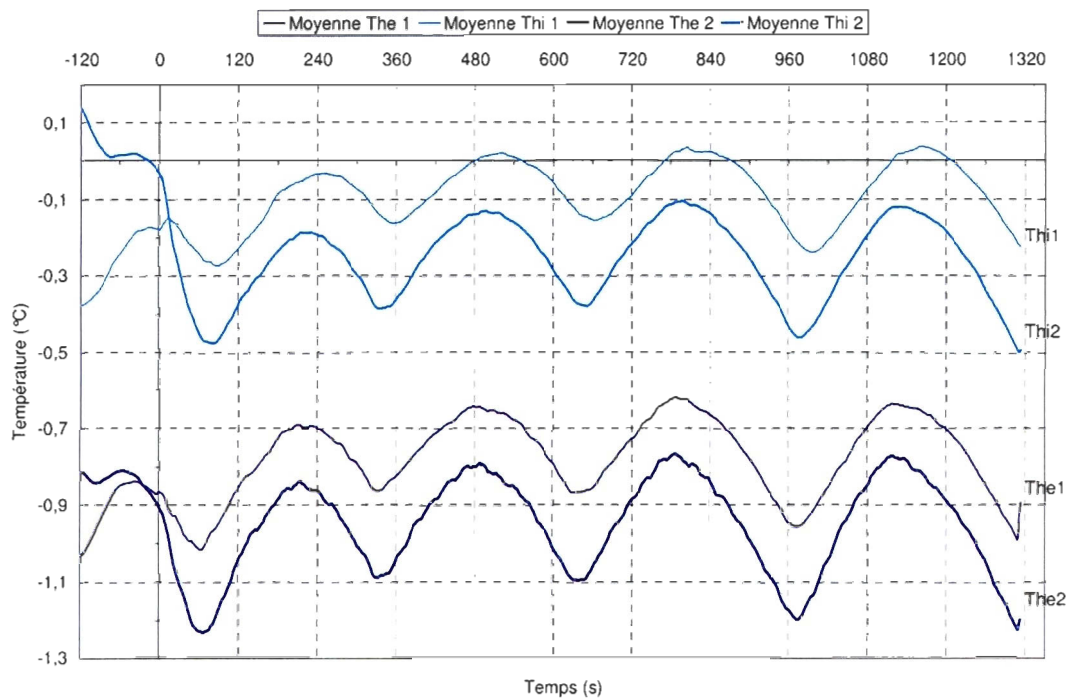


Figure 3-20. Températures mesurées par les thermocouples de l'intrados (1 et 2).

La Figure 3-21 présente la température de surface pour l'essai 1-0-1, à 20 m/s et 0 °C. Les courbes sont tracées à partir de moyennes sur 10 s pour des raisons de lisibilité.

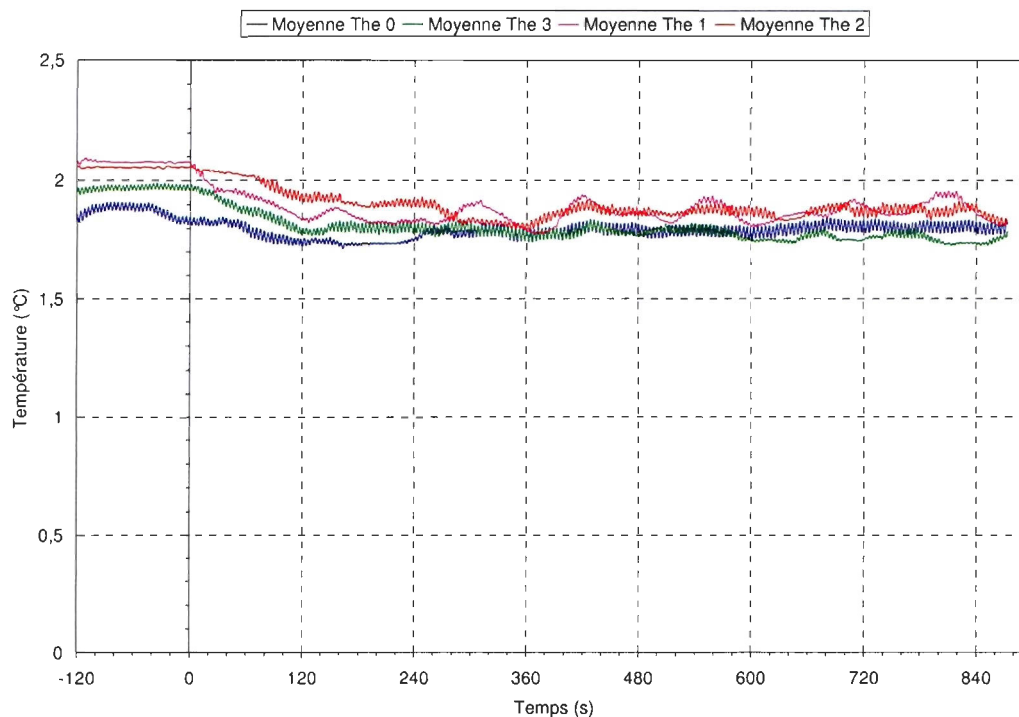


Figure 3-21. Évolution de la température de surface du profil pour l'essai 1-0-1.

La température des thermocouples externes, utilisés dans le calcul de la puissance de chauffage est très stable durant le test. La température moyenne est de 1.8 °C pour les thermocouples de l'extrados et de 1.88 °C pour les thermocouples de l'intrados avec une température cible T_c fixée à 2 °C.

Les températures internes sont encore plus stables (les courbes de la Figure 3-22 ne sont pas moyennées). La température mesurée par le thermocouple 2 est très faible par rapport aux autres thermocouples. Il ne s'agit pas d'un dysfonctionnement puisque le thermocouple fonctionne parfaitement bien lors des tests de givrage et que l'écart se crée lors de la mise en route du chauffage. Il est possible que la localisation du thermocouple dans une zone de faible épaisseur induise une plus grande sensibilité de la mesure à la température de l'écoulement.

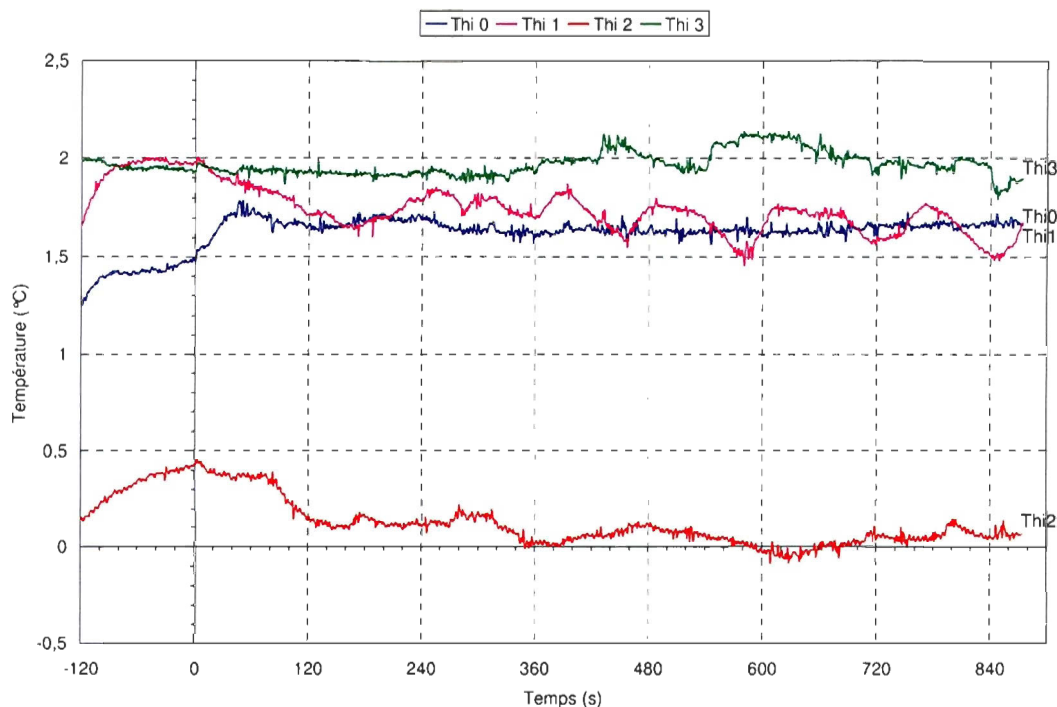


Figure 3-22. Évolution de la température interne du profil pour l'essai 1-0-1.

L'analyse des variations de la température au cours des différents essais renseigne sur les phénomènes mis en jeu à la surface du profil et permet de mieux appréhender les problèmes liés au givrage et au dégivrage et donc la consommation de puissance nécessaire.

3.8 Analyse des variations de la puissance consommée

Même si aucun givre n'a été accumulé lors des essais 1-0 et 2-0 à 0 °C et respectivement 20 et 30 m/s, le dégivrage a été réalisé dans le but de déterminer les pertes énergétiques pour cette valeur limite de température.

Les courbes d'évolution de puissance au cours d'un test sont basées sur des moyennes mobiles sur 30 s de la puissance enregistrée, tel qu'illustré à la Figure 3-23, afin d'améliorer la lisibilité des courbes.

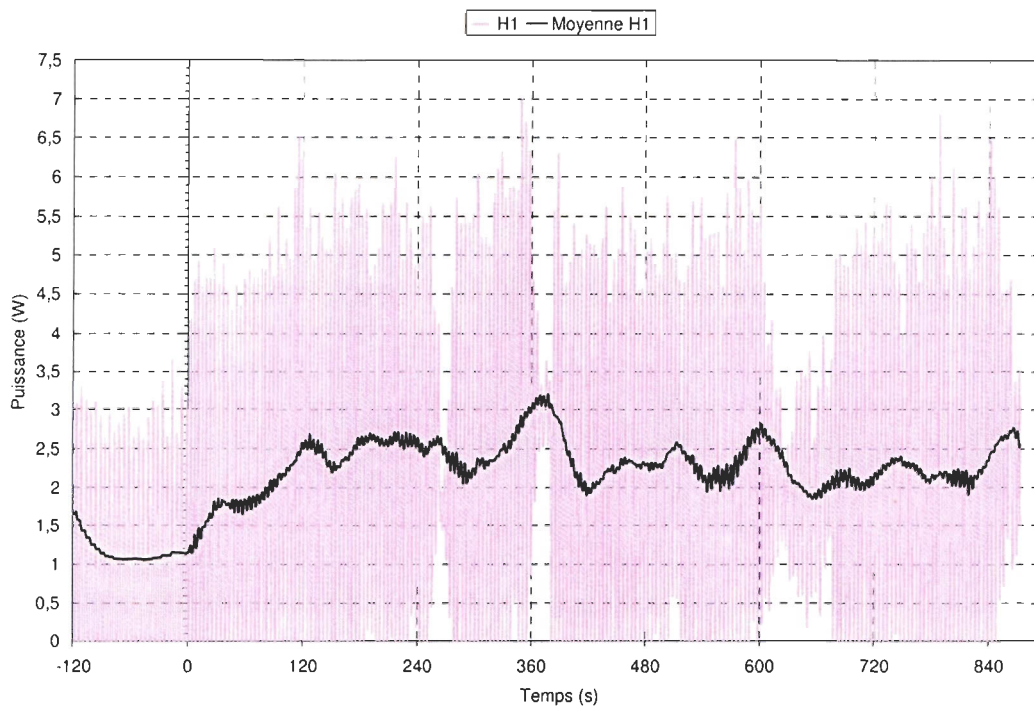


Figure 3-23. Puissance envoyée dans l'élément chauffant 1 lors de l'essai 1-0-1.

La puissance envoyée subit d'importantes variations. Ceci est dû au procédé de calcul par essai/erreur très rapide. Ce problème a été résolu dans une certaine mesure lors de la deuxième série d'essais par l'intégration d'un second terme constant dans l'équation de calcul de la puissance (voir section 3.3.3).

La puissance moyenne envoyée est stable. Elle est plus importante mais aussi plus sensible aux variations de température de la soufflerie pour l'élément chauffant 1 car il est le plus exposé au vent et aux gouttelettes d'eau, donc au givre. Les pics de puissance observés sur la Figure 3-24 (à 370 s et 600 s en particulier) correspondent aux baisses de température de l'air dans la soufflerie. Le procédé choisi pour le contrôle du dégivrage est très sensible aux variations de la température extérieure, ce qui permet au système de s'adapter rapidement aux baisses de température et d'éviter l'apparition du givre, mais aussi de réduire la consommation de puissance lorsque les besoins diminuent. La puissance consommée par l'élément chauffant 2 est la plus faible. De plus, en raison de l'angle d'attaque utilisé, le chauffage réalisé par cet élément est moins utile pour le dégivrage du profil (voir résultats de forme de glace, sections 3.9.2 et 3.11.4).

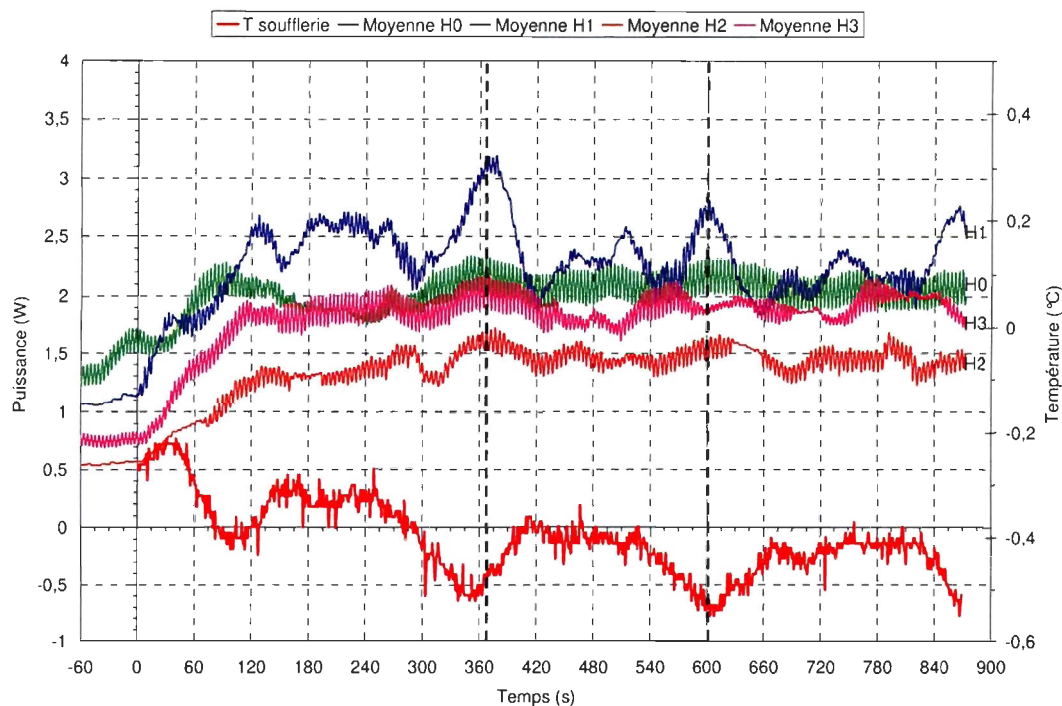


Figure 3-24. Puissance envoyée dans les éléments chauffants lors de l'essai 1-0-1.

La puissance nécessaire augmente avec la vitesse de l'essai car les pertes énergétiques et l'accumulation de glace sont plus importantes. Les résultats de consommation de puissance présentés en détails en Annexe E montrent que l'essai 3-0 (40 m/s et 0 °C) consomme plus de puissance pour le dégivrage que les essais 1-0 et 2-0 (20 et 30 m/s à 0 °C) : la consommation de puissance lors de l'essai 3-0 est supérieure de 27 à 44 % (selon les éléments chauffants) à celle de l'essai 1-0 et de 25 à 33 % à celle de l'essai 2-0. De plus, changer la valeur de h_1 (voir section 3.6.3) dans l'équation de calcul de la puissance implique d'importantes variations dans la puissance consommée lors du chauffage. Les essais 3-0-1, 3-0-2 et 3-0-4, réalisés dans les mêmes conditions de chauffage, donnent des résultats très similaires à ceux des essais 1-0 et 2-0 et peuvent donc être comparés avec eux. L'essai 3-0-3 est réalisé avec $h_1=2$ W/K, soit plus du double que pour les autres essais ($h_1=0.9$ W/K). Cependant les valeurs de température et puissance enregistrées ne sont que légèrement supérieures à celles obtenues pour l'essai 3-0-4 en raison du procédé de contrôle de la puissance. Celui-ci coupe l'alimentation dès que la température du thermocouple enregistre la valeur de la température cible T_c , soit 2 °C dans ce cas. Les variations de puissance, visibles sur la Figure 3-8 sont donc importantes.

Les essais 3-0-5 et 3-0-6 sont réalisés avec $h_i=0.1$ W/K et $h_i=0.01$ W/K respectivement. Ceci conduit à une consommation de puissance plus faible de 10 à 35 % selon les éléments chauffants pour l'essai 3-0-5 par rapport à l'essai 3-0-2 et de 67 à 78 % pour l'essai 3-0-6, mais le temps requis pour atteindre la température T_c est plus long à chaque cycle. Le système est donc plus économique mais moins rapide.

3.9 Résultats en termes de dégivrage

L'analyse des formes de givre obtenues est importante pour pouvoir déterminer l'impact du dégivrage sur les propriétés aérodynamiques du profil. La précision des tracés des formes de givre est limitée à ± 1 mm en raison du procédé de mesure. Les formes ont été relevées manuellement, à l'aide de mesures ponctuelles d'épaisseurs sur le profil glacé et de photos.

3.9.1 Particularités du profil

Le profil est séparé en trois sections (voir Figure 2-15). Seuls les résultats de température, puissance et forme de givre de la section du centre sont étudiés. La séparation du profil en trois sections contrôlées indépendamment et la contrainte de démontabilité imposée impliquent une discontinuité dans le chauffage en raison d'un écart entre les éléments chauffants (voir Chapitre 2). Ceci a pour effet de laisser un espace libre pour le givrage. Cet inconvénient est visible à la Figure 3-25 et est de plus en plus nuisible avec l'augmentation de la sévérité des conditions de givrage.

L'accrétion de glace importante sur les surfaces non chauffées est flagrante. Ceci perturbe l'observation des formes de glace lorsque le dégivrage est actif et rend impossible l'interprétation du poids global de glace sur le profil lors des essais de dégivrage.

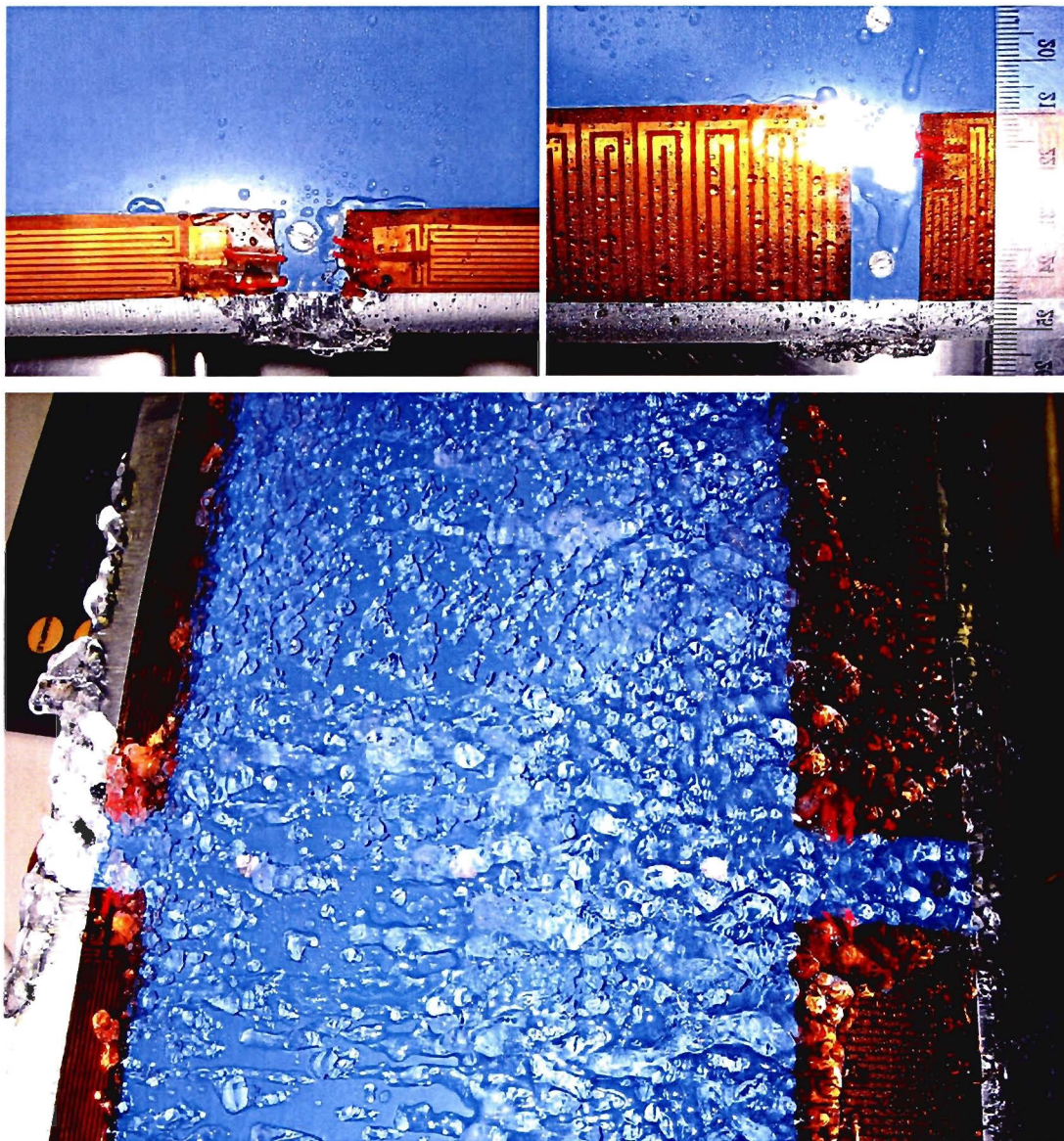


Figure 3-25. Impact de l'écart entre les éléments chauffants pour les essais 3-0-1 et 3-3.5-1.

L'épaisseur des éléments chauffants est de 0.25 mm. Bien que très faible, cette épaisseur a un impact sur l'accrétion de glace, comme l'illustre la Figure 3-26 pour l'essai 1-6.5-2 à 20 m/s et -6.5 °C.

Les éléments chauffants sont collés sur le profil à l'aide d'une colle contact. L'infiltration de petites quantités d'eau sous les bords des éléments chauffants ainsi que les cycles de gel/dégel répétés

entraînent malgré tout le décollement progressif des éléments. Pour pallier à ce problème, des bandes d'aluminium autocollant utilisées pour l'étanchéité du profil servent également au maintien en place des éléments chauffants. Ceci implique une épaisseur supplémentaire à la surface du profil. De plus, les fils d'alimentation des éléments chauffants créent une protubérance supplémentaire sur laquelle vient s'accumuler facilement le givre. Un exemple de l'effet de ces perturbations est visible à la Figure 3-27 pour l'essai de givrage 2-4.5-G1 à 30 m/s et -4.5°C .

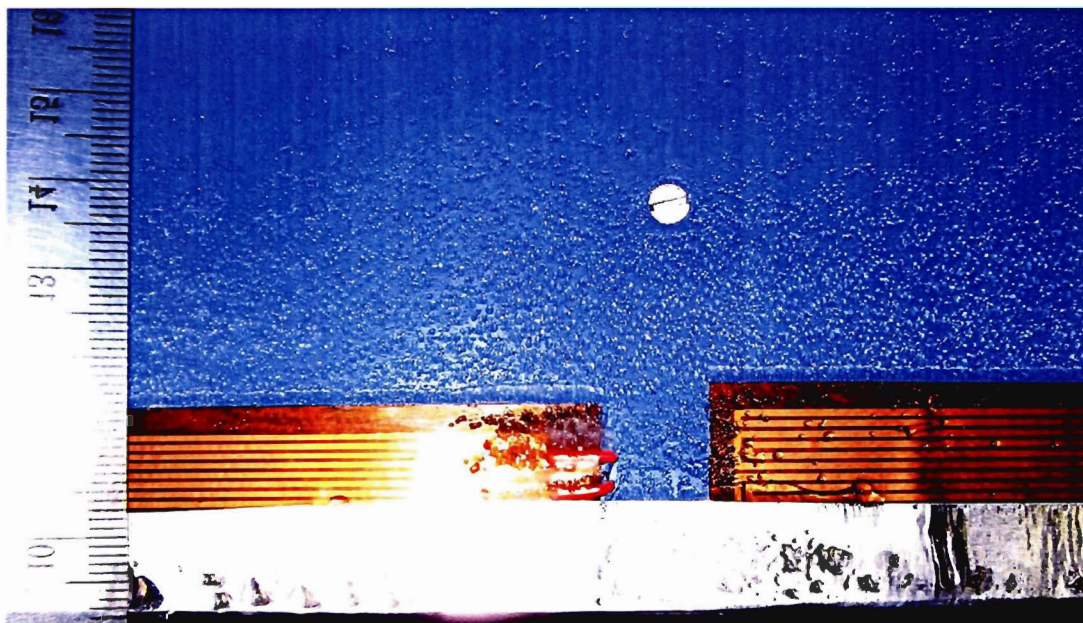


Figure 3-26. Impact de l'épaisseur des éléments chauffants sur l'accrétion de glace.

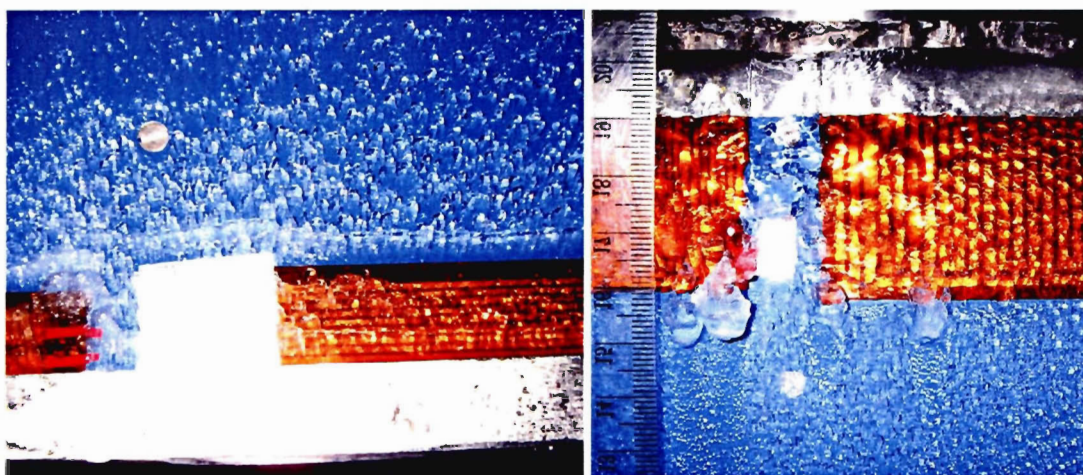


Figure 3-27. Impact de l'épaisseur des divers éléments sur le givrage. (Essai 2-4.5-G1)

3.9.2 Formes de glace des essais préliminaires

Les formes de glace des essais préliminaires ne sont pas tracées dans leur totalité. Seuls les éléments pertinents concernant l'accrétion sur le profil sont fournis.

Lors des essais à 0 °C, l'accumulation de glace est nulle à 20 et 30 m/s. À 40 m/s, une accumulation de glace est visible sur le bord d'attaque et sur le bord de fuite. Sur le bord d'attaque, la glace a 3 mm d'épaisseur, sur le bord de fuite, l'accumulation s'arrête à 1 mm. La glace observée est translucide, synonyme d'accrétion en régime humide. Elle est facile à décoller à la main.

À 20 m/s, lorsque la température diminue, on passe progressivement du régime d'accrétion humide au régime sec. À -1.5 °C, le régime d'accrétion est encore humide, mais la quantité de glace accumulée en fin de test est plus importante. Le dégivrage permet d'éliminer toute la glace. À -6.5 °C, les conditions sont incertaines et les deux types de glace, translucide et opaque sont observés. Le givre dépasse de 5 mm le bord d'attaque lors des tests de givrage. La Figure 3-30 présente les résultats de givrage lors de l'essai 1-6.5-G1 à 20 m/s et -6.5 °C.

Les étalonnages de LWC (voir Annexe D) ont montré que la répartition de la teneur en eau n'est pas uniforme sur la largeur de la section d'essai. Au centre, là où le givre est translucide sur la Figure 3-30, la teneur en eau est plus importante que dans les deux zones adjacentes où le givre est opaque. La valeur de LWC donnée plus tôt pour les conditions expérimentales est une moyenne pour toute la section d'essai.

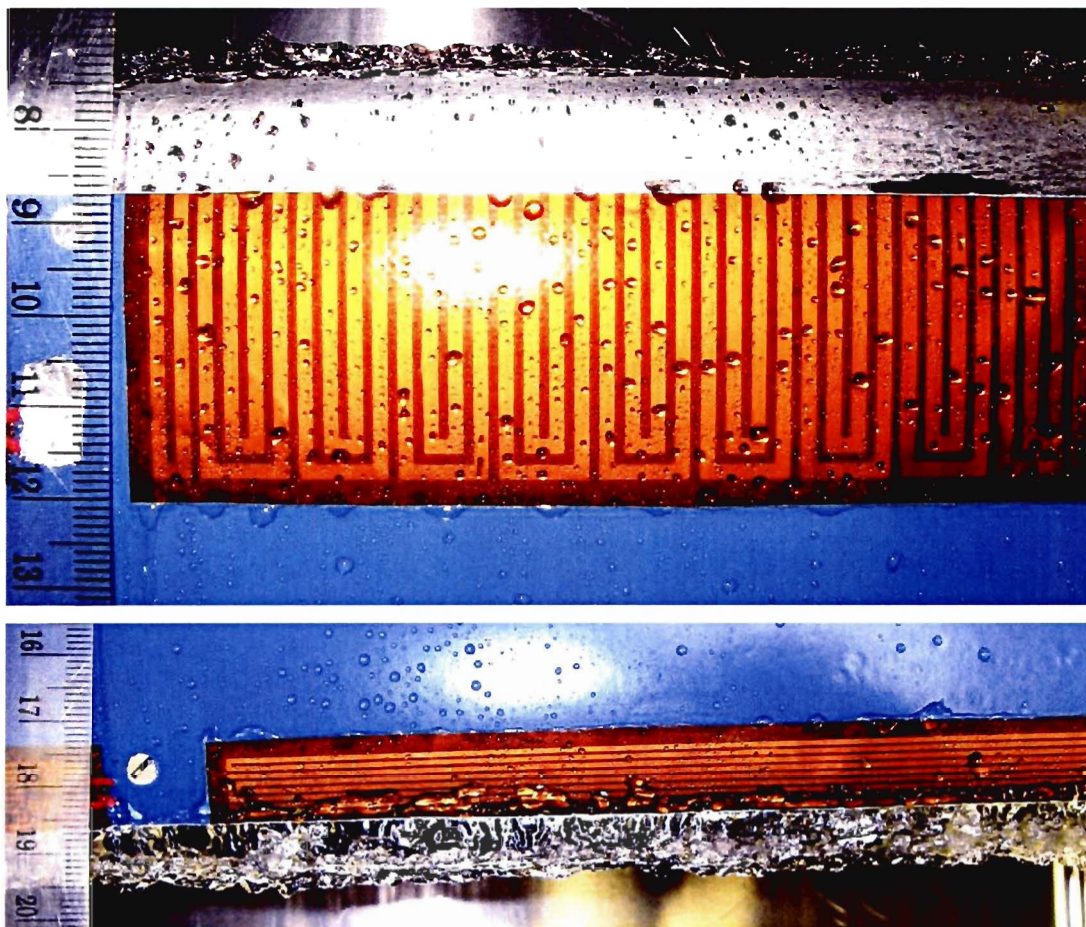


Figure 3-28. Accumulation de glace lors de l'essai 3-0-G1.

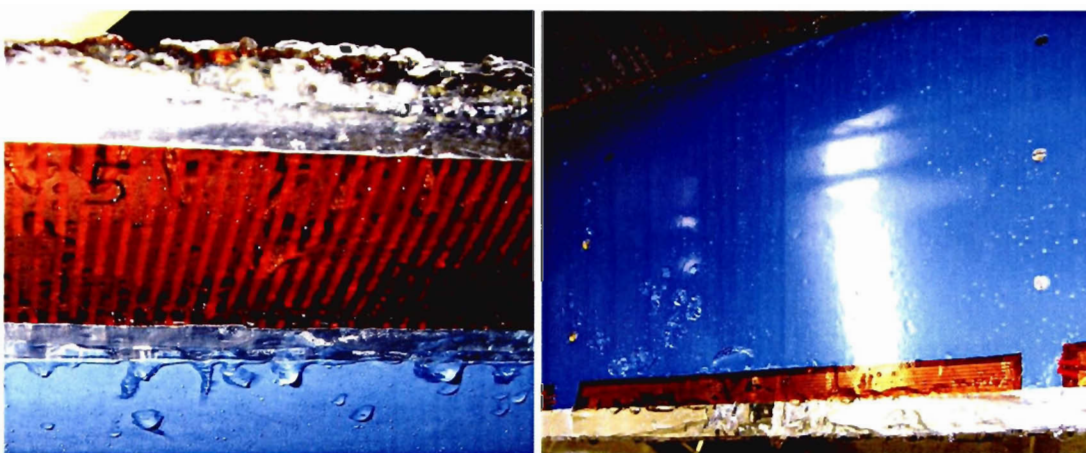


Figure 3-29. Accumulation de glace lors de l'essai 3-0-G4.

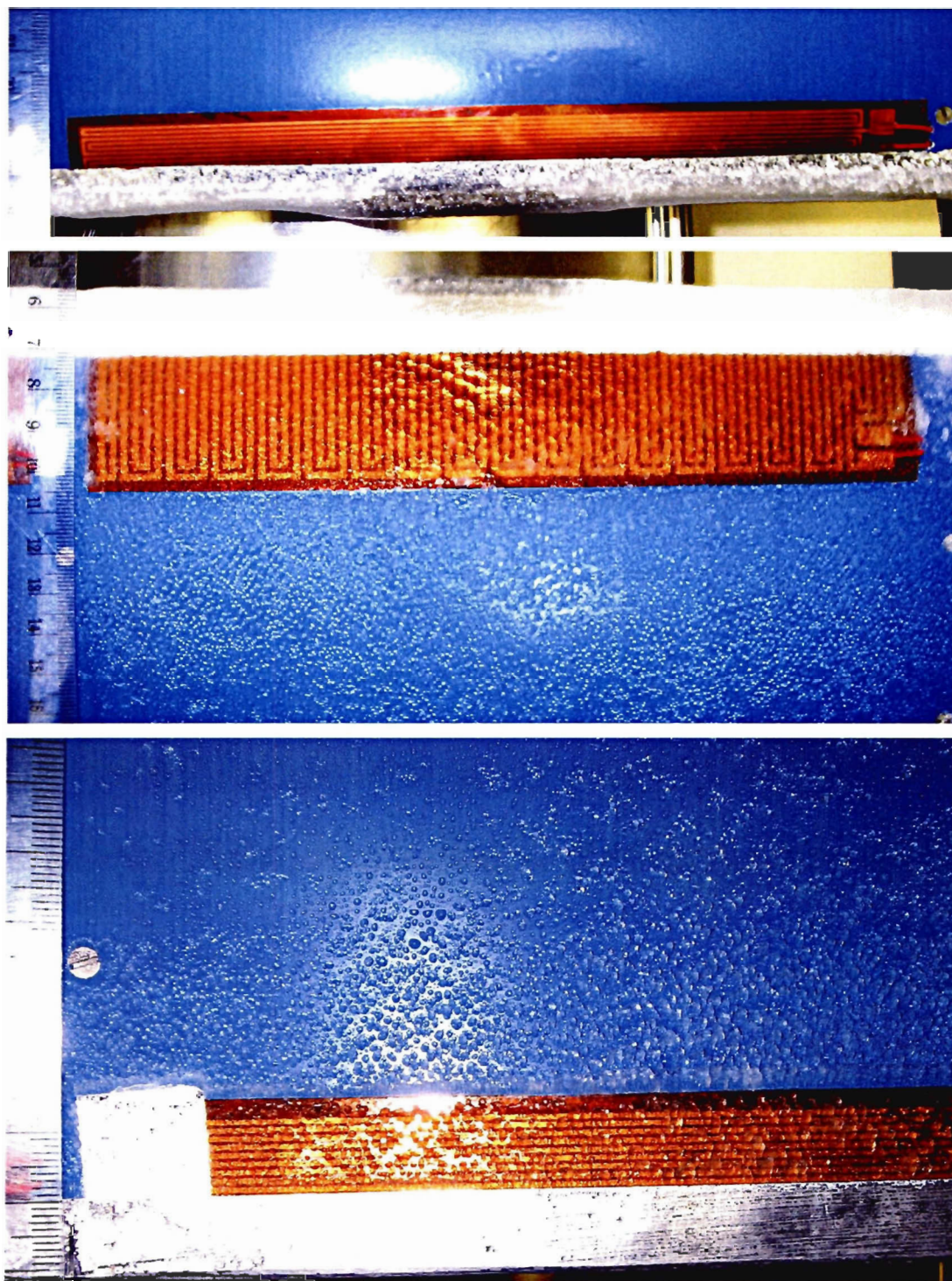


Figure 3-30. Répartition du givre lors de l'essai I-6.5-G1.

Les essais de dégivrage à 20 m/s et $-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ montrent que la zone sensible du profil, la plus difficile à dégivrer est au bout du bord d'attaque, à proximité du point de stagnation. Ceci est partiellement dû à l'écart entre les deux éléments chauffants 0 et 1, mais également à la vitesse du vent à la surface du profil (voir section 4.2). La Figure 3-31 présente l'état du bord d'attaque pour les différentes valeurs de h_1 lors des essais 1-6.5-1 ($h_1=0.9$), 1-6.5-3 ($h_1=3$) et 1-6.5-4 ($h_1=5$) de gauche à droite.

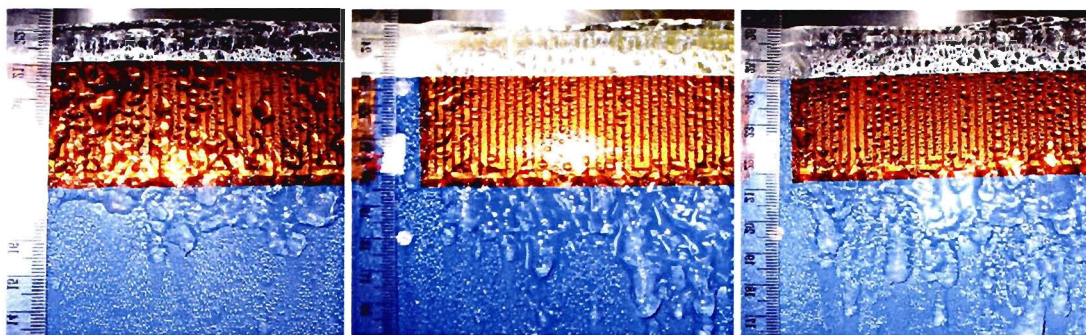


Figure 3-31. État du bord d'attaque en fonction du coefficient de transfert thermique.

L'épaisseur de glace sur le bord d'attaque diminue mais les trainées de glace formée par le regel de l'eau qui s'est écoulée sur l'élément chauffant sont plus importantes (en longueur comme en épaisseur).

À 30 m/s, alors que les essais à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ne présentaient pas de glace à la surface du profil, une importante accréation de glace est visible lors des essais à $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, sur l'intrados principalement. La Figure 3-32 présente ces résultats. Le givre translucide visible sur le profil caractérise l'accréation en régime humide.

Le dégivrage dans ces conditions laisse apparaître de manière évidente le principal point faible du système de dégivrage. Les surfaces recouvertes d'éléments chauffants sont quasiment dégivrées en totalité, alors que d'importantes coulées de glace recouvrent le reste de la surface.

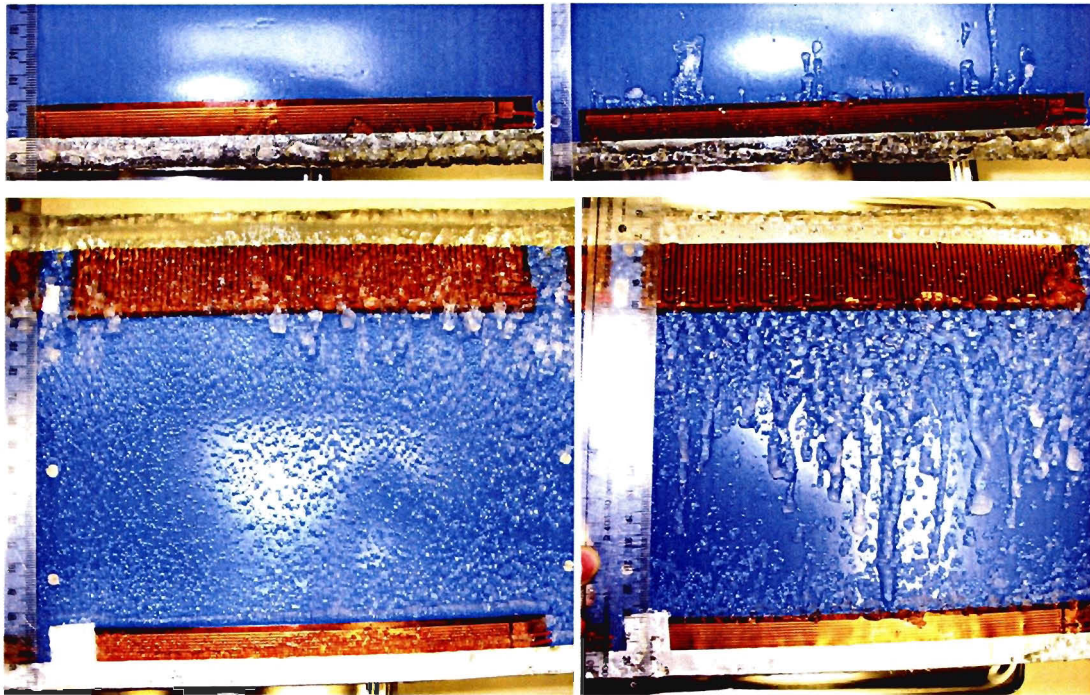


Figure 3-32. Comparaison des résultats des essais 2-4.5-G1 et 2-4.5-4.

À 40 m/s, les résultats sont encore plus impressionnants. De plus, des tests réalisés à $-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ montrent l'importante accréation de glace en régime humide entre les éléments chauffants du bord d'attaque et de fuite.

3.10 Effet des parois

Comme indiqué dans le Chapitre deux, trois zones sont définies sur la section de pale (Figure 2-15). Seule une des zones latérales (extérieures) est instrumentée. En effet, les résultats sont supposés identiques dans ces deux zones d'après une étude préliminaire (Chapitre 1). Les thermocouples placés sur l'une des zones latérales ainsi que les formes de glace obtenues permettent d'interpréter les phénomènes qui se produisent dans ces sections.

3.10.1 Zone latérale

La conception du montage expérimental permet l'observation du flux thermique dirigé latéralement dans la zone d'essai. En fait, la formation de givre entre les éléments chauffants lors des essais de

dégivrage montre bien que le chauffage est nul dès que la surface du profil n'est plus recouverte d'un élément chauffant.

3.10.2 Effet de bord

Les bords de la section d'essai induisent un échange thermique avec l'extérieur de la soufflerie. La température ambiante est proche de 23°C alors que les essais ont lieu à -10 °C. Par conséquent la forme du givre ainsi que les conditions de dégivrage sont affectées à proximité des parois de la soufflerie. La section centrale, située à 0.15 m de chaque paroi, est étudiée en s'assurant qu'à cette distance les effets de bord sont négligeables.

3.11 Essais à -10 °C

À la suite des essais préliminaires, une série d'essais à -10 °C a été réalisée. Cette température est choisie de manière à avoir une accumulation de glace en régime sec pour chacune des trois vitesses de vent. L'accrétion en régime sec est une des accumulations de glace les plus couramment observées lors des phénomènes de givrage sur les parcs éoliens et est une des causes importantes de pertes de puissance. L'optimisation des conditions de chauffage réalisée lors des essais préliminaires est appliquée et l'analyse des résultats obtenus est réalisée.

3.11.1 Conditions de chauffage optimisées

Après l'analyse des résultats de la première série de tests, l'équation utilisée pour le contrôle du chauffage a été améliorée. Afin d'avoir une température de surface plus stable, un terme constant est ajouté à l'équation de calcul de la puissance pour prendre en considération les pertes par convection dans l'air. L'équation (41) devient :

$$P = h_1 \cdot A \cdot (T_{\infty} - T_c) + h_1 \cdot A \cdot (T_s - T_c) \quad (42)$$

La puissance fournie au système est par conséquent plus constante. La Figure 3-33 présente la nouvelle évolution de la puissance en fonction de la température. Même si les températures cibles ne sont pas les mêmes (2 °C pour l'essai 3-0-3 contre 15 °C pour l'essai 3-10-3), l'évolution de la puissance au cours du temps est uniformisée et le système fonctionne en continu et non par périodes marche/arrêt comme dans les premiers essais. La puissance n'est jamais nulle et la température de

surface est toujours supérieure à la température cible. La rentabilité du chauffage est meilleure. Les deux variables sont plus stables.

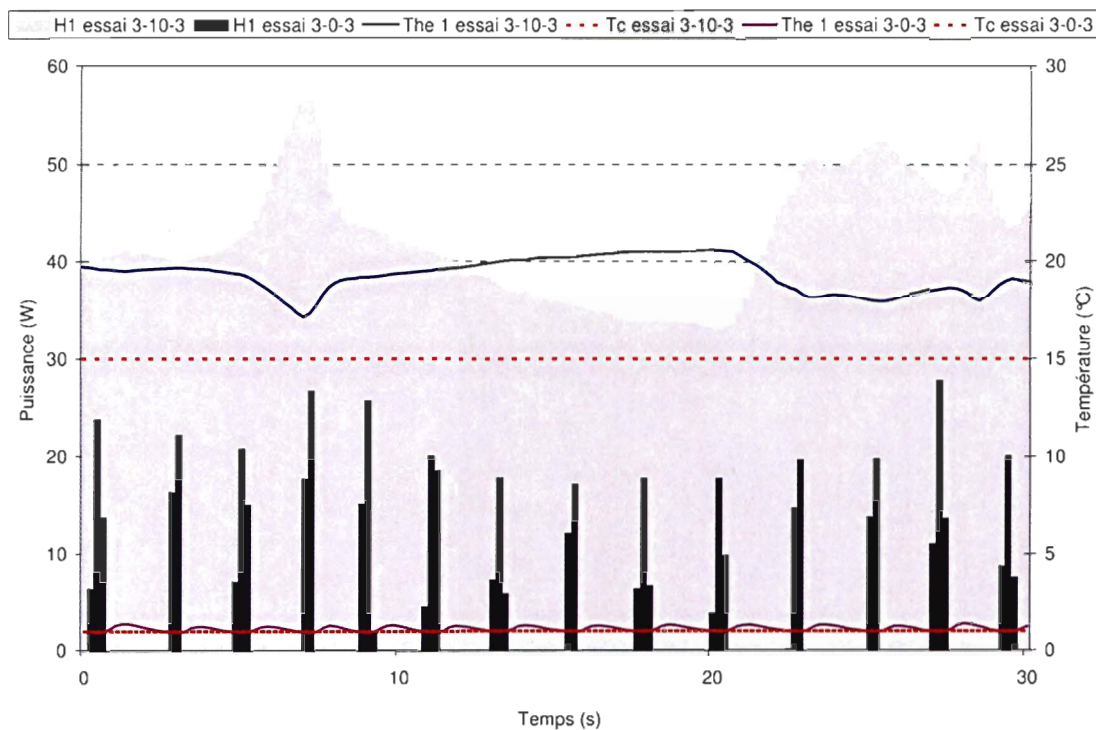


Figure 3-33. Détail des variations de puissance lors des essais 3-10-3 et 3-0-3.

3.11.2 Analyse des températures enregistrées

L'évolution de la température enregistrée par les différents thermocouples donne de nombreux renseignements sur les phénomènes mis en jeu au cours de l'accrétion de glace. Les paragraphes suivants détaillent ces résultats.

3.11.2.1 Température au cours des tests de givrage

La température mesurée par les thermocouples est enregistrée toutes les 0.2 s durant les essais. La température du profil suit les variations de température de la soufflerie, comme illustré à la Figure 3-34. La variation de température dans la soufflerie est de ± 1 °C en raison du temps de réponse du système de contrôle de la température.

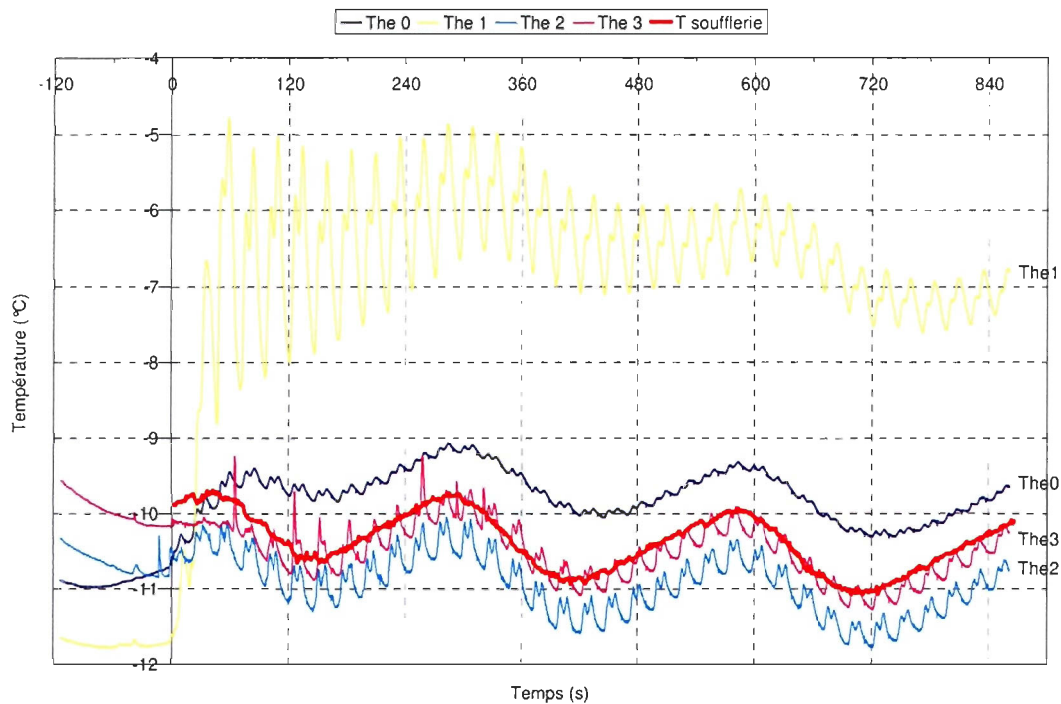


Figure 3-34. Température enregistrée à la surface du profil pour l'essai I-10-G2.

Le thermocouple 1 enregistre la température de surface la plus élevée. Il est localisé dans la zone d'impact des gouttelettes en raison de l'angle d'attaque choisi et c'est dans cette région que l'on enregistre la plus importante accumulation de glace. Le thermocouple 0 enregistre une température plus élevée que les thermocouples 2 et 3 pour tous les essais du fait de la convection plus faible dans cette zone, en raison de l'angle d'attaque de 12° (le bord de fuite à l'extrados est dans la zone de décrochage).

Durant les tests de givrage, la température interne fluctue beaucoup moins que la température externe. Ceci s'observe en comparant la Figure 3-35 avec la Figure 3-34 et s'explique par l'effet d'amortissement thermique de la paroi et la conduction à travers son épaisseur, qui réduit les fluctuations. Les températures de l'intrados Thi1, Thi2, The1 et The2 sont les plus sensibles à l'impact des gouttelettes. Ceci s'explique par leur position directement exposée à l'écoulement.

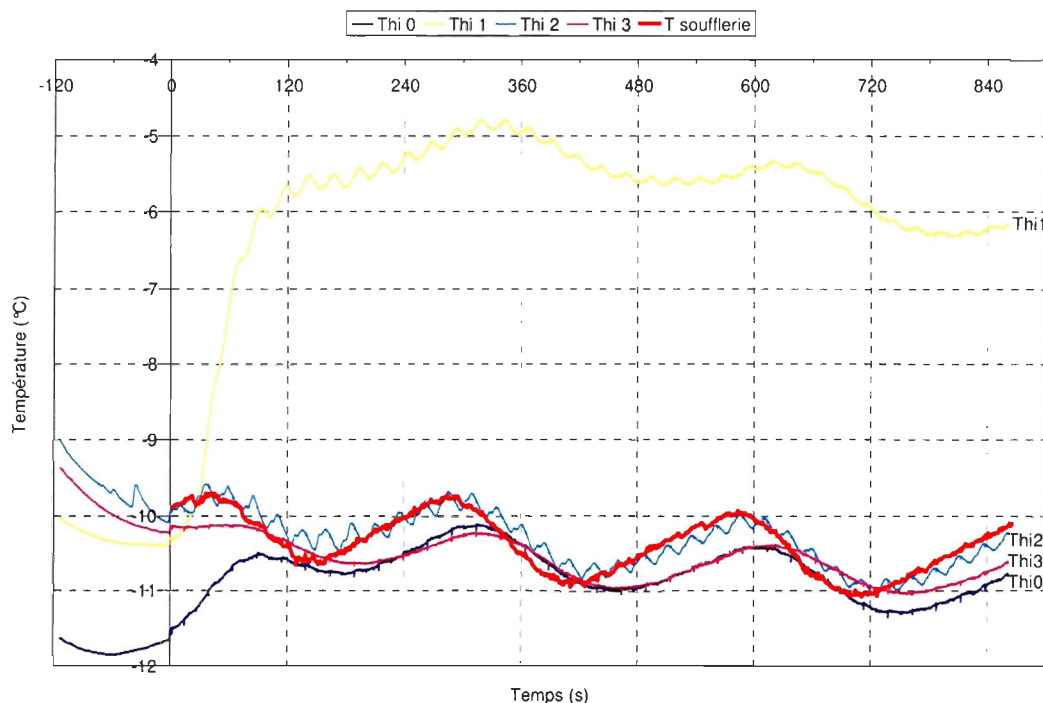


Figure 3-35. Température interne pour l'essai 1-10-G2.

L'augmentation de la température de surface due à la libération de la chaleur latente de solidification de l'eau est de plus en plus visible avec l'augmentation de la vitesse de vent dans la soufflerie car de plus grandes quantités d'eau sont capturées par le profil et se transforment en glace. Les Figure 3-36 et Figure 3-37 présentent la température interne pour l'essai 2-10-G1 à 30 m/s et l'essai 3-10-G1 à 40 m/s. Pour le thermocouple 1, l'augmentation de la température, en raison de la libération de l'énergie de solidification de l'eau, puis sa diminution, due au refroidissement progressif de la glace formée est visible. Le thermocouple 2, exposé à l'impact des gouttelettes d'eau, voit aussi sa température augmenter en raison de cette chaleur de solidification.

Compte tenu de la vitesse plus élevée durant le test 3-10-G1 (40 m/s), la solidification se fait plus rapidement, mais les températures en fin d'essai sont similaires dans les deux cas (à 30 m/s et 40 m/s).

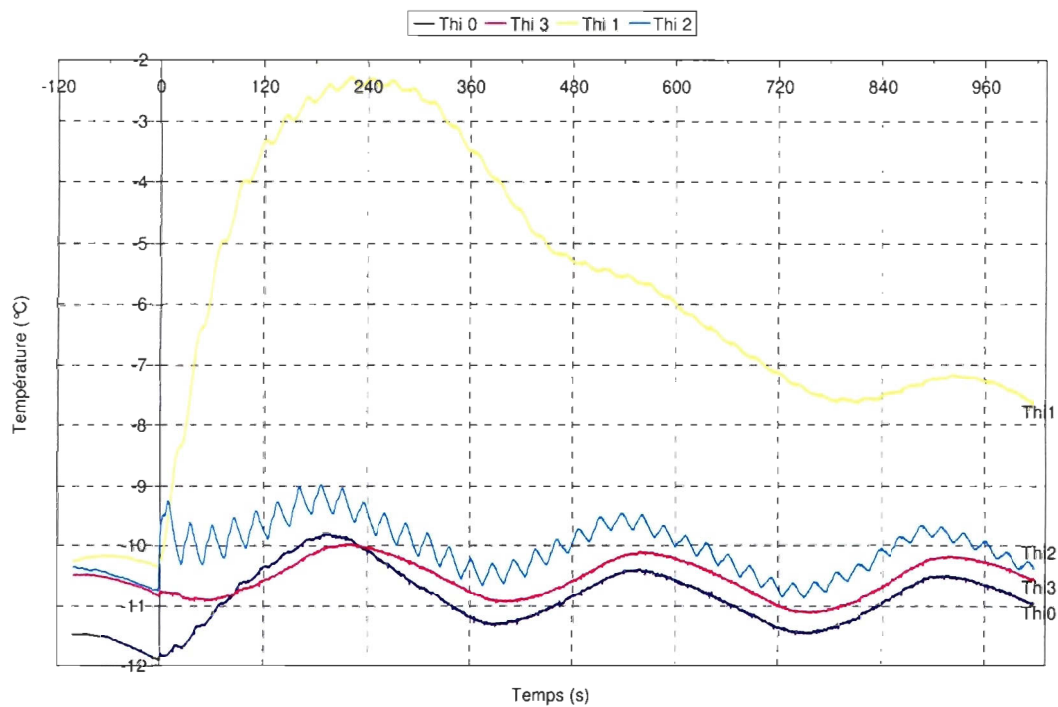


Figure 3-36. Température interne de l'essai 2-10-G1.

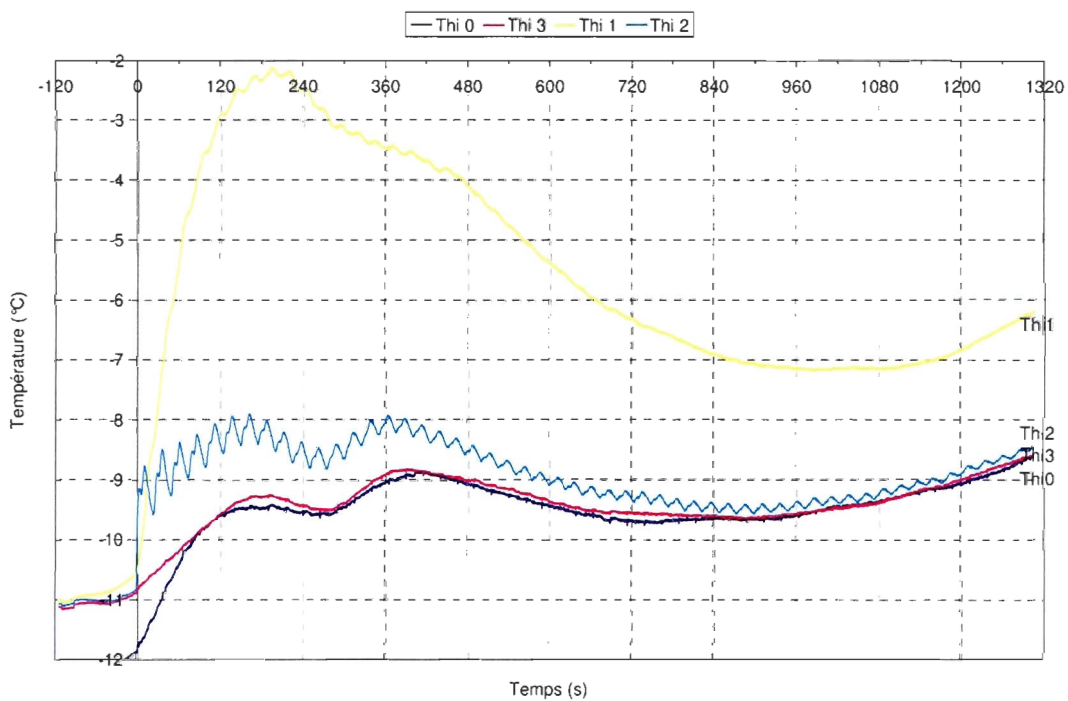


Figure 3-37. Température interne de l'essai 3-10-G1.

3.11.2.2 Température au cours des tests de dégivrage

Lors des essais de dégivrage, la température dépend totalement de l'énergie fournie. Les températures à la surface du profil suivent les variations rapides de la puissance envoyée (Figure 3-38).

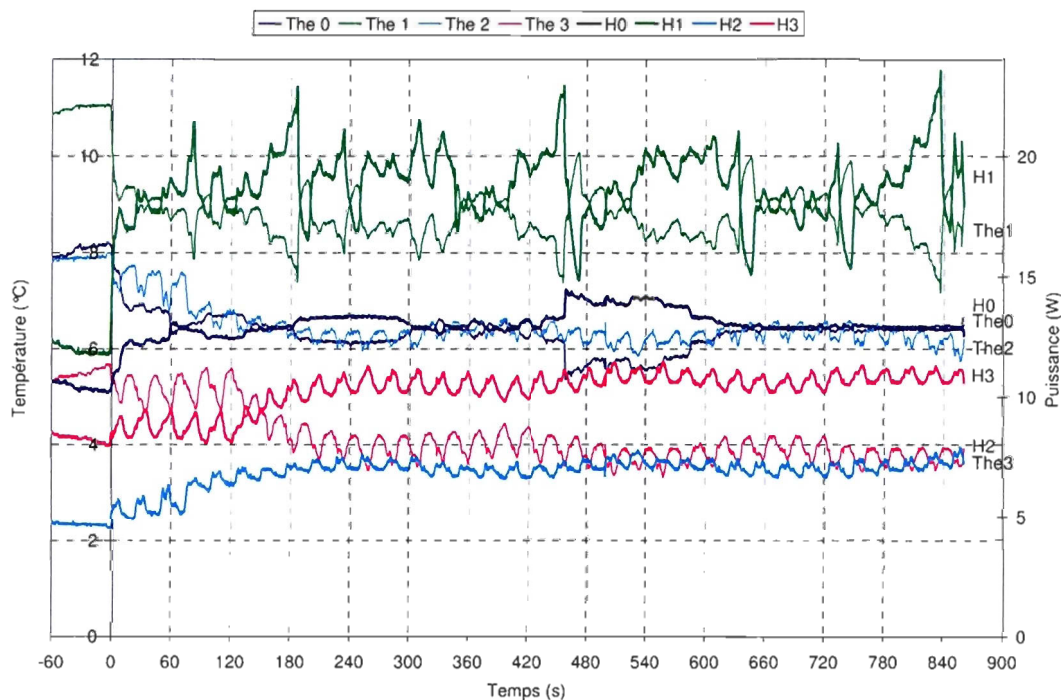


Figure 3-38. Courbes de puissance et température pour l'essai 1-10-3.

La température enregistrée à l'intérieur du profil est plus constante, comme pour les essais de givrage. La température Th_1 est la moins uniforme lors du dégivrage. Cette zone du profil est la plus exposée aux gouttelettes d'eau, donc la plus sollicitée et le contrôle du chauffage y est plus difficile.

La Figure 3-39 présente la température enregistrée par les thermocouples sur la face interne du profil. La température est constante au cours de l'essai et les fluctuations visibles sur la surface extérieure du profil ont disparu en raison de l'inertie thermique de l'épaisseur de la paroi.

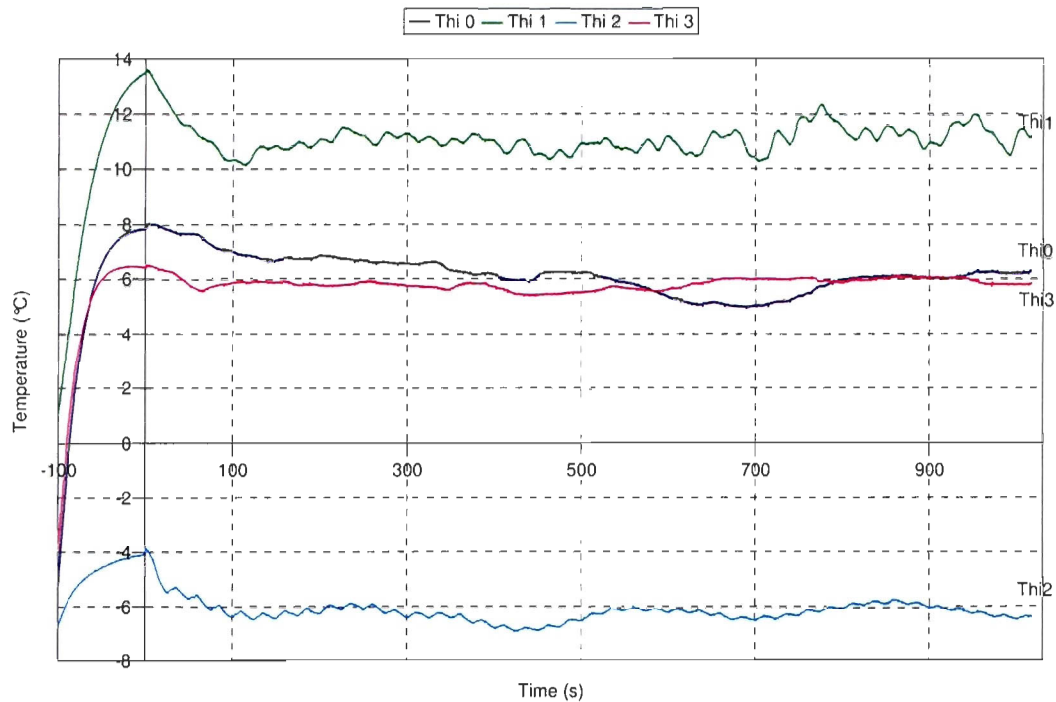


Figure 3-39. Température interne lors de l'essai 2-10-3.

Le thermocouple interne 2 est plus sensible aux variations de température de la soufflerie que les autres thermocouples internes. Son bon fonctionnement a été démontré lors des essais de givrage. Ce phénomène est probablement dû à la faible épaisseur du profil à ce niveau, comme stipulé à la section 3.7. Le Tableau 3-12 donne les températures moyennes pour chaque élément et chaque test après le régime transitoire estimé à 180 s.

Tableau 3-12. Températures moyennes lors des essais de givrage et dégivrage.

The	0	3	1	2	Thi	0	3	1	2	T soufflerie
1-10-G1	-10,19	-10,88	-6,97	-11,41	1-10-G1	-11,22	-11,12	-6,13	-10,78	-10,76
1-10-G2	-9,73	-10,53	-6,47	-11,00	1-10-G2	-10,73	-10,66	-5,54	-10,41	-10,37
1-10-1	4,18	3,80	5,10	5,61	1-10-1	0,90	5,56	4,01	-5,83	-10,22
1-10-2	4,32	3,73	4,98	5,58	1-10-2	0,43	5,35	4,16	-6,05	-10,52
1-10-3	6,22	3,90	8,70	6,28	1-10-3	3,60	5,48	6,95	-6,23	-10,79
2-10-G1	-9,92	-10,48	-6,73	-10,69	2-10-G1	-10,80	-10,51	-5,57	-10,07	-10,37
2-10-G2	-10,62	-11,59	-8,22	-11,78	2-10-G2	-11,78	-11,68	-6,92	-11,13	-11,32
2-10-1	6,74	4,50	4,87	6,04	2-10-1	1,90	5,27	3,74	-6,03	-10,53
2-10-2	5,96	3,71	4,28	5,63	2-10-2	0,97	4,86	3,59	-6,13	-10,98
2-10-3	11,12	4,25	13,29	6,12	2-10-3	6,01	5,83	11,10	-6,24	-11,05
3-10-G1	-8,01	-9,46	-6,85	-9,55	3-10-G1	-9,35	-9,29	-5,57	-8,93	-9,31
3-10-G2	-9,23	-10,42	-8,02	-10,66	3-10-G2	-10,55	-10,35	-6,68	-10,06	-10,23
3-10-1	8,74	5,03	6,06	6,39	3-10-1	3,70	5,01	4,64	-4,59	-10,33
3-10-2	15,33	11,05	13,08	13,36	3-10-2	9,71	11,47	10,52	-1,35	-10,72
3-10-3	14,64	5,53	17,19	6,76	3-10-3	10,78	6,22	14,21	-3,02	-10,43
3-10-4	16,20	6,24	19,22	7,52	3-10-4	12,37	6,90	15,74	-3,29	-9,86

Lors des essais de givrage, la température de surface est proche de celle de la soufflerie. La température enregistrée par le thermocouple 1 est la plus élevée en raison de sa position sur l'intrados, proche du point de stagnation, et de la chaleur libérée par la solidification de l'eau, plus importante sur le thermocouple 1 qui vient augmenter la température moyenne.

Lors des essais de dégivrage, la température de surface est toujours supérieure à la consigne. La température interne est toujours inférieure de plusieurs degrés à la température externe (2 à 10 °C selon les éléments et les conditions expérimentales) en raison de l'inertie de l'épaisseur du profil et de la cavité interne de la section qui baisse la température enregistrée par les thermocouples internes.

3.11.3 Puissance mesurée

La puissance est calculée toutes les 0.2 s pendant toute la durée des tests. La température moyenne dans la soufflerie au cours d'un essai varie parfois et induit alors de légères différences dans la consommation de puissance. Ces écarts sont cependant inférieurs à 2%.

En raison du faible temps de réponse des thermocouples, les variations rapides de la puissance envoyée sont instantanément mesurées par les thermocouples. Puisque leur mesure est utilisée pour le contrôle du chauffage, cela conduit à des variations rapides de la valeur de puissance calculée. La Figure 3-40 présente l'évolution de la puissance consommée pour chaque élément chauffant pour le test 1-10-1 (20 m/s et -10 °C) et illustre bien ces changements rapides de la puissance qui permettent de suivre les fluctuations de température dans la section d'essai.

De même que pour la température, la puissance de l'élément 1 est celle qui fluctue le plus car c'est l'élément le plus exposé aux gouttelettes d'eau.

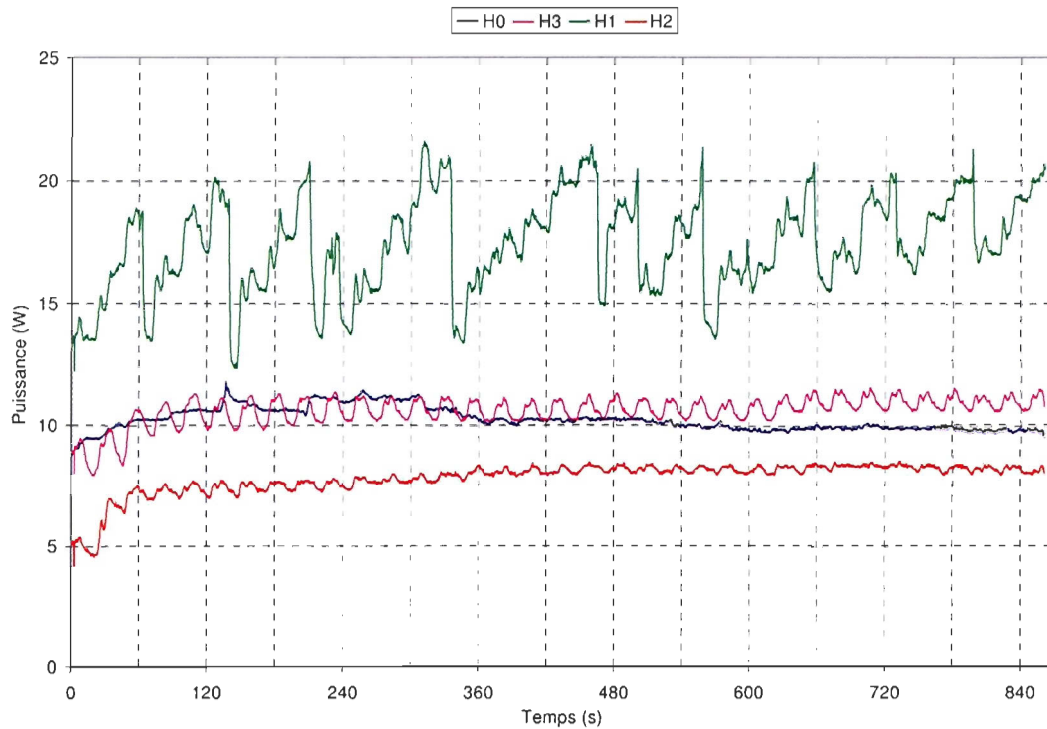


Figure 3-40. Puissance consommée pour l'essai 1-10-1.

Le Tableau 3-13 donne les puissances moyennes consommées par chaque élément pour chaque test à l'issue du régime transitoire estimé à 180 s. La différence (ΔT_{he}) entre la température moyenne ambiante (température de l'écoulement dans la section d'essai) et la température moyenne de surface enregistrée par le thermocouple est fournie à titre indicatif pour chaque élément chauffant.

Tableau 3-13. Puissance moyenne consommée par chaque élément chauffant.

	Pmoy H0 (W)	ΔT_{he0} (°C)	Pmoy H3 (W)	ΔT_{he3} (°C)	Pmoy H1 (W)	ΔT_{he1} (°C)	Pmoy H2 (W)	ΔT_{he2} (°C)
1-10-1	10,24	14,40	10,79	14,02	17,71	15,32	8,08	15,83
1-10-2	10,02	14,84	10,91	14,25	18,07	15,50	8,14	16,10
1-10-3	13,18	17,01	10,66	14,69	18,89	19,49	7,08	17,07
2-10-1	9,58	17,27	14,62	15,03	27,58	15,40	11,17	16,57
2-10-2	10,07	16,94	14,58	14,69	26,87	15,26	10,74	16,61
2-10-3	19,98	22,17	15,2	15,30	30,18	24,34	10,98	17,17
3-10-1	6,23	19,07	16,43	15,36	27,16	16,39	12,68	16,72
3-10-2	12,85	26,05	24,61	21,77	38,06	23,80	18,27	24,08
3-10-3	29,13	25,07	16,77	15,96	38,98	27,62	12,14	17,19
3-10-4	32,99	26,06	17,85	16,10	43,36	29,08	13,05	17,38

Compte tenu des conditions expérimentales et des valeurs de h_1 et T_c qui augmentent lorsque la vitesse de l'air dans la soufflerie augmente, certaines observations peuvent être faites. La consommation de puissance augmente avec la vitesse de l'écoulement, de même que la différence

de température entre l'écoulement et la surface du profil. L'augmentation de consommation de puissance est la plus importante pour les éléments chauffants 0 et 1 en raison de la consigne T_c qui est augmentée (T_c vaut 5 °C pour l'essai 1-10-3, 10 °C pour les essais 2-10-3 et 3-10-2 et 15 °C pour les essais 3-10-3 et 3-10-4 sur le bord d'attaque) alors que les autres conditions expérimentales restent les mêmes (40 m/s et -10 °C). La consommation énergétique est plus importante pour l'élément chauffant 3 que pour le 2 alors que la consigne est la même dans les deux cas. Cette différence est due à la turbulence dans la région de l'élément 3.

3.11.4 Résultats en terme de dégivrage

Les formes de glace sur le profil sont présentées dans les Figure 3-41 à Figure 3-43. Elles sont un bon indicateur visuel de la performance du dégivrage.

La surface du profil recouverte de givre représente respectivement 25.4 %, 42.7 % et 48.5 % de la surface totale du profil pour les essais en givrage à 20, 30 et 40 m/s et représente 18.6 %, 22.3 % et 38.8 % de la surface totale du profil pour les essais en dégivrage. Ceci illustre bien l'amélioration de l'état de la surface du profil grâce au dégivrage malgré le regel de l'eau fondue.

Du givre blanc caractérisé par une faible densité s'accumule sur la section de pale pendant les tests de givrage, principalement sur le bord d'attaque et l'intrados. Cette glace est caractéristique d'un régime d'accrétion sec. Au contraire, la glace translucide qui apparaît plutôt lors des essais de dégivrage et dans les cornes de glace du bord d'attaque en givrage a une densité élevée, c'est du verglas formé par de l'eau qui ruissèle puis gèle, caractéristique d'un régime d'accrétion humide.

Avec l'augmentation de la vitesse d'essai, une plus grande proportion de l'accumulation est de type verglas. Le givre rugueux accumulé sur l'intrados augmente aussi, en quantité et en étendue, avec la vitesse de l'écoulement. Proche des parois de la section d'essai, le verglas visible au centre du profil se transforme en givre en raison des échanges thermiques qui ont lieu avec le milieu extérieur.

D'une manière générale, lorsque la vitesse de l'écoulement augmente, le givre se transforme en verglas. Une augmentation de la valeur de la teneur en eau liquide (LWC) où de la température de l'air a le même effet.

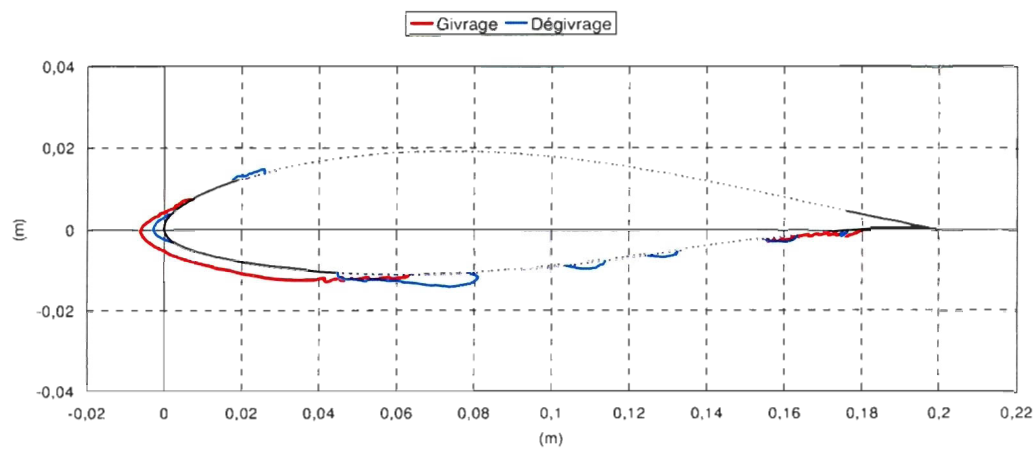


Figure 3-41. Formes de glace pour les essais 1-10-G et 1-10-3 à 20 m/s.

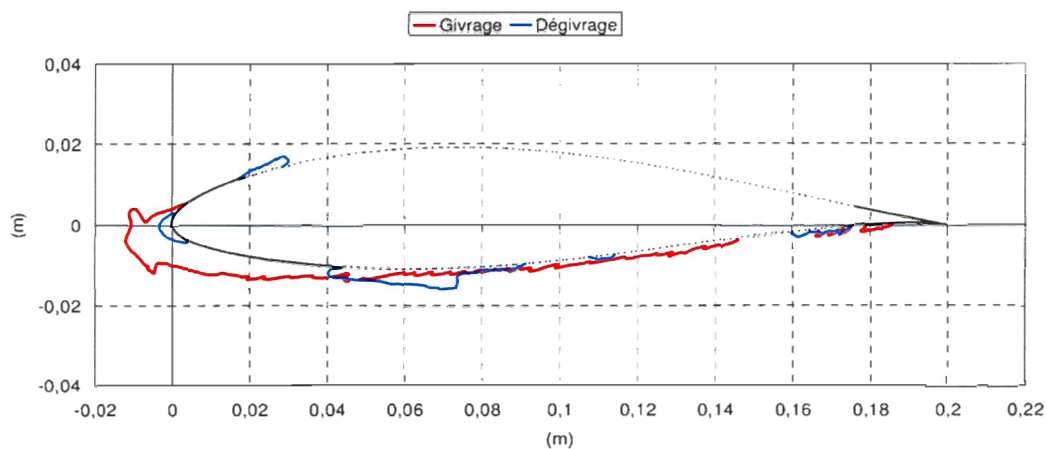


Figure 3-42. Formes de glace pour les essais 2-10-G et 2-10-3 à 30 m/s.

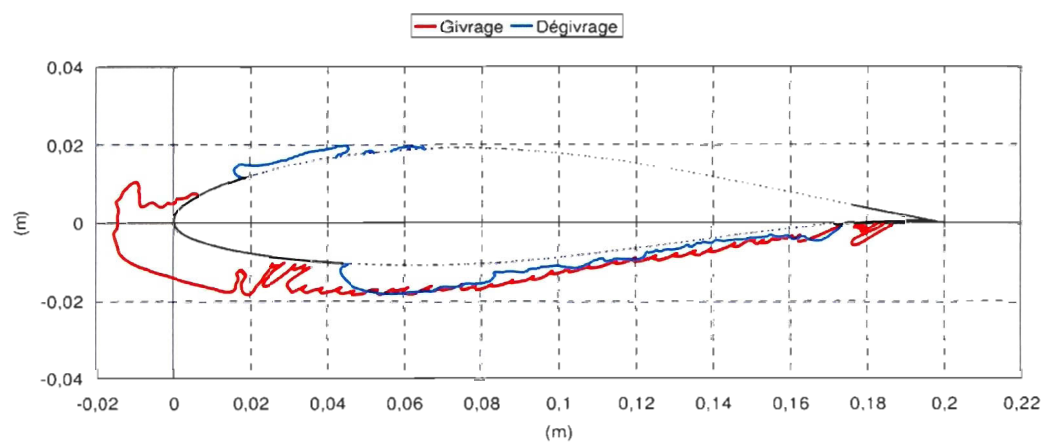


Figure 3-43. Formes de glace pour les essais 3-10-G et 3-10-3 à 40 m/s.

Lors de l'essai 1-10-G2 à 20 m/s (Figure 3-44), le givre est laiteux, rugueux mais aucune corne ne se forme sur le bord d'attaque. Du verglas est visible à l'extrémité de la glace accumulée qui laisse supposer qu'une simulation plus longue aurait vu apparaître une corne de verglas sur le bord d'attaque.

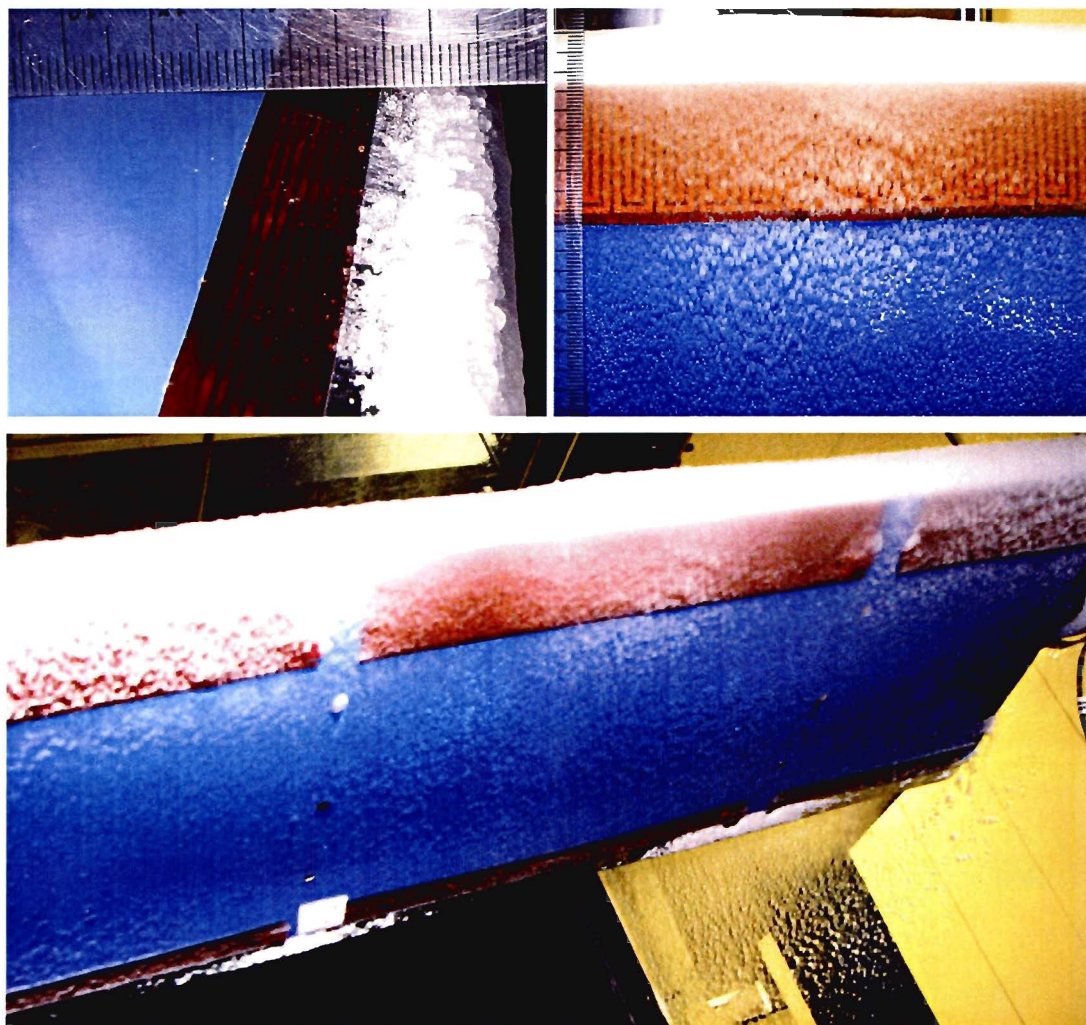


Figure 3-44. Profil givré lors de l'essai 1-10-G2

Pour les essais 2-10-G2 et 3-10-G1 à 30 et 40 m/s (Figure 3-45 et Figure 3-46) une protubérance très rugueuse est visible sur le bord d'attaque lors du givrage. La glace recouvre la majeure partie de l'intrados pour l'essai à 30 m/s et la totalité de l'intrados pour l'essai à 40 m/s. À 30 m/s, du verglas

est bien visible sur le bord d'attaque. Il est entouré de givre partout ailleurs et beaucoup de givre rugueux se forme sur l'intrados.

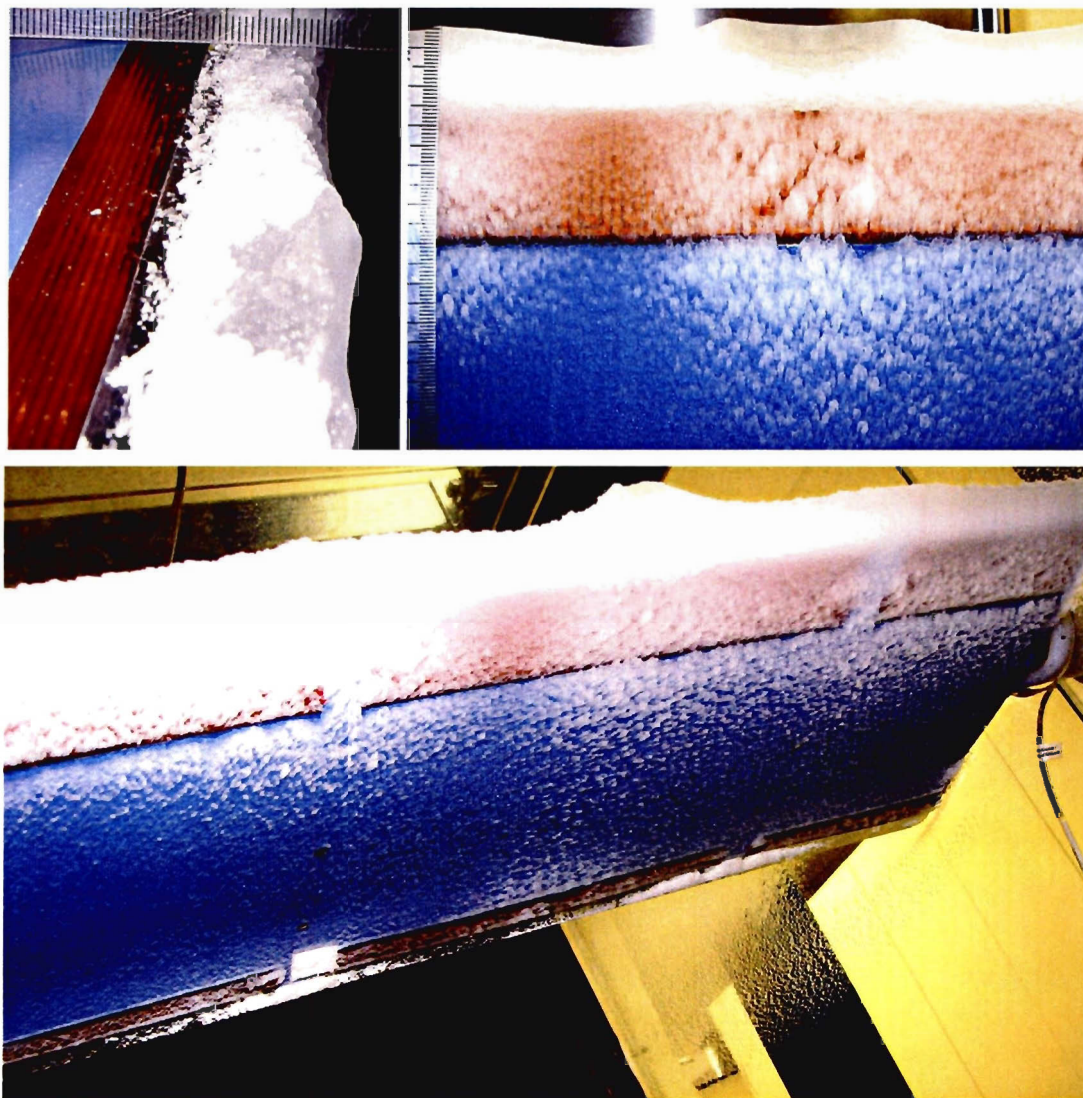


Figure 3-45. Profil givré lors des essais 2-10-G2.

Lors de l'essai 3-10-G1 à 40 m/s (voir Figure 3-46), l'accrétion de glace sur le bord d'attaque est très impressionnante. La corne sur le bord d'attaque est du verglas. La rugosité du givre sur l'intrados est plus importante avec l'augmentation de la vitesse d'essai.

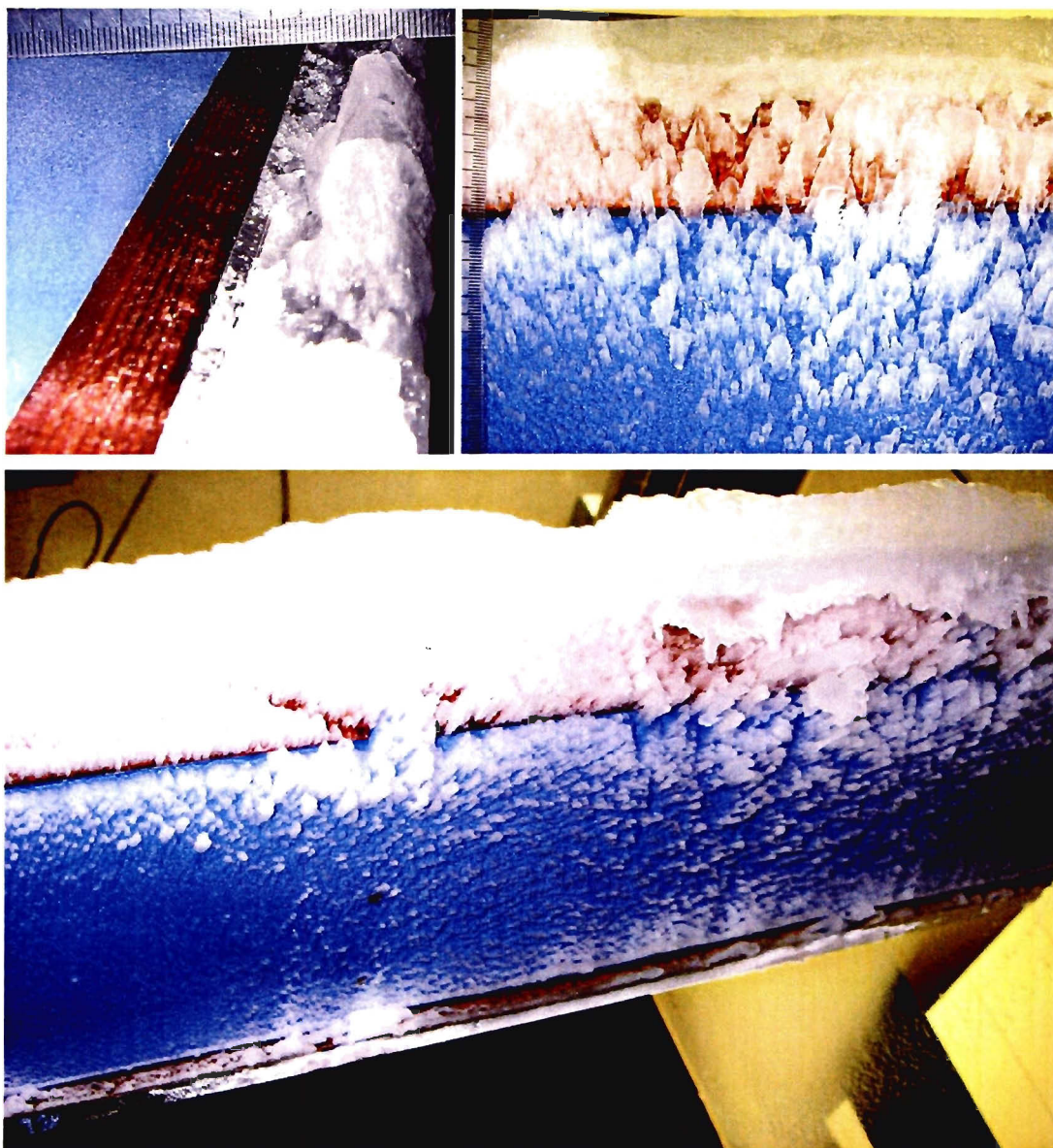


Figure 3-46. Profil givré lors de l'essai 3-10-G1

Il est clair que la glace se forme majoritairement sur le bord d'attaque et sur la surface recouverte des éléments chauffants, validant leur positionnement.

Lors des tests de dégivrage à 20 et 30 m/s, de la glace s'accumule sur le nez du profil malgré le dégivrage. Ceci est probablement dû à l'écart entre les éléments chauffants 0 et 1. Par ailleurs, l'eau qui s'écoule sur les éléments chauffants regèle juste après pour former une crête. C'est là le point

faible de ce type de dégivrage. La Figure 3-47 présente le détail de l'élément 0 lors du dégivrage. Le regel de l'eau après l'élément chauffant est de plus en plus volumineux à mesure que la vitesse du vent dans la soufflerie et que la quantité d'eau captée augmentent.

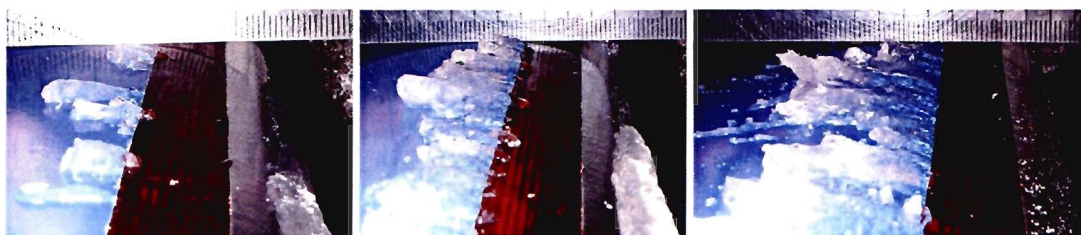


Figure 3-47. Détail de l'élément 0 après dégivrage pour les essais 1-10-3, 2-10-3 et 3-10-3.

La Figure 3-48 permet de comparer l'état de l'intrados après les trois essais de dégivrage 1-10-3, 2-10-3 et 3-10-4 (à -10°C et respectivement 20 m/s, 30 m/s et 40 m/s). Les essais de dégivrage 3-10-3 et 3-10-4 donnent exactement les mêmes résultats. Il est très clair que la quantité d'eau qui regivre augmente puisque la quantité collectée globalement sur tout le profil (observable lors des essais de givrage) augmente avec l'augmentation de la vitesse.

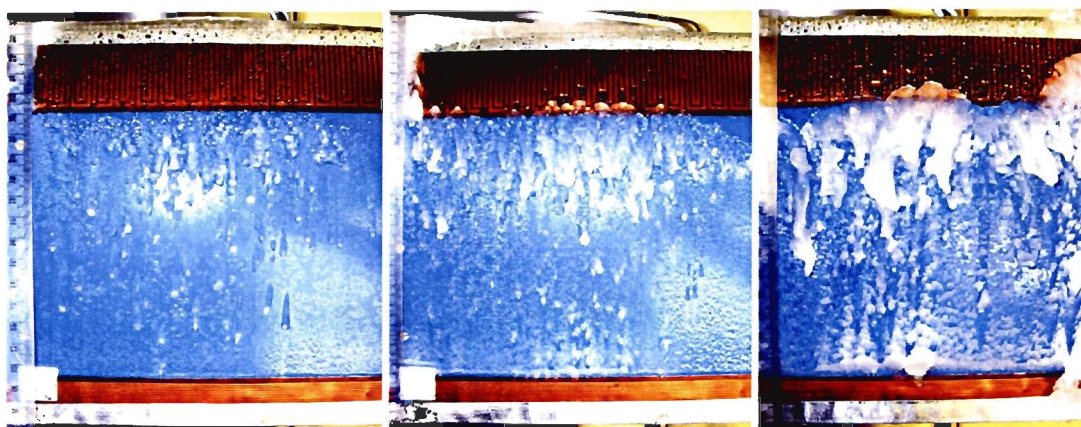


Figure 3-48. Intrados du profil pour les essais 1-10-3, 2-10-3 et 3-10-4.

Les bords d'attaque sont presque totalement dégivrés après chacun des tests de dégivrage. Comme les propriétés aérodynamiques du profil sont les plus sensibles aux modifications géométriques qui ont lieu sur le bord d'attaque, les performances de la pale devraient être améliorées après le dégivrage. Ce point est détaillé à la section 4.3.

Tous ces résultats expérimentaux permettent de mieux comprendre le phénomène de givrage et le processus de dégivrage le long du profil aérodynamique. L'étude expérimentale de l'optimisation du chauffage est exposée. Les points faibles du système et les aspects à analyser plus en détails sont mis en évidence.

CHAPITRE 4

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

Ce chapitre présente l'interprétation des résultats obtenus au Chapitre 3. Il propose différentes améliorations à apporter au système, analyse les résultats d'un point de vue aérodynamique et donne une interprétation globale pour la pale étudiée. Les résultats et conclusions obtenus par le Finnish Meteorological Institute sont présentés et comparés à ceux de cette étude car ils portent sur la même technologie de dégivrage.

4.1 Vitesse du vent et coefficient de transfert de chaleur local

Les différences de résultats (consommation de puissance et température) entre les quatre zones chauffées du profil (bord d'attaque et de fuite, intrados et extrados) amènent la question de la validité des approximations réalisées. En particulier, la vitesse et le coefficient de transfert de chaleur ont été considérés constants pour tout le profil (approximation d'une plaque plane) alors qu'ils varient en fait sur sa surface.

La vitesse du vent dans la soufflerie est contrôlée à ± 0.75 m/s. La vitesse d'essai indiquée au Tableau 3-3 et utilisée comme donnée lors des expérimentations est la vitesse à l'entrée de la zone d'essai (20, 30 et 40 m/s). Elle correspond à la vitesse relative arrivant sur la pale (U_{rel} sur la Figure 3-1).

Les graphiques de cette section sont obtenus à l'aide du logiciel « LIMA Icing2D » développé au LIMA. Ce logiciel de calcul non visqueux permet de déterminer la variation de la vitesse et du coefficient de transfert de chaleur convectif le long du profil. L'écoulement potentiel est calculé avec la méthode des panneaux de Hess et Smith [25]. Les calculs sont réalisés à la frontière de la couche limite, là où la vitesse tangentielle est maximale. La vitesse tangentielle est présentée à la Figure 4-1 pour les trois conditions testées dans ce travail (20, 30 et 40 m/s). L'abscisse s est la coordonnée surfacique du profil. 0 est le point de stagnation, les coordonnées négatives sont sur l'intrados et les coordonnées positives sur l'extrados.

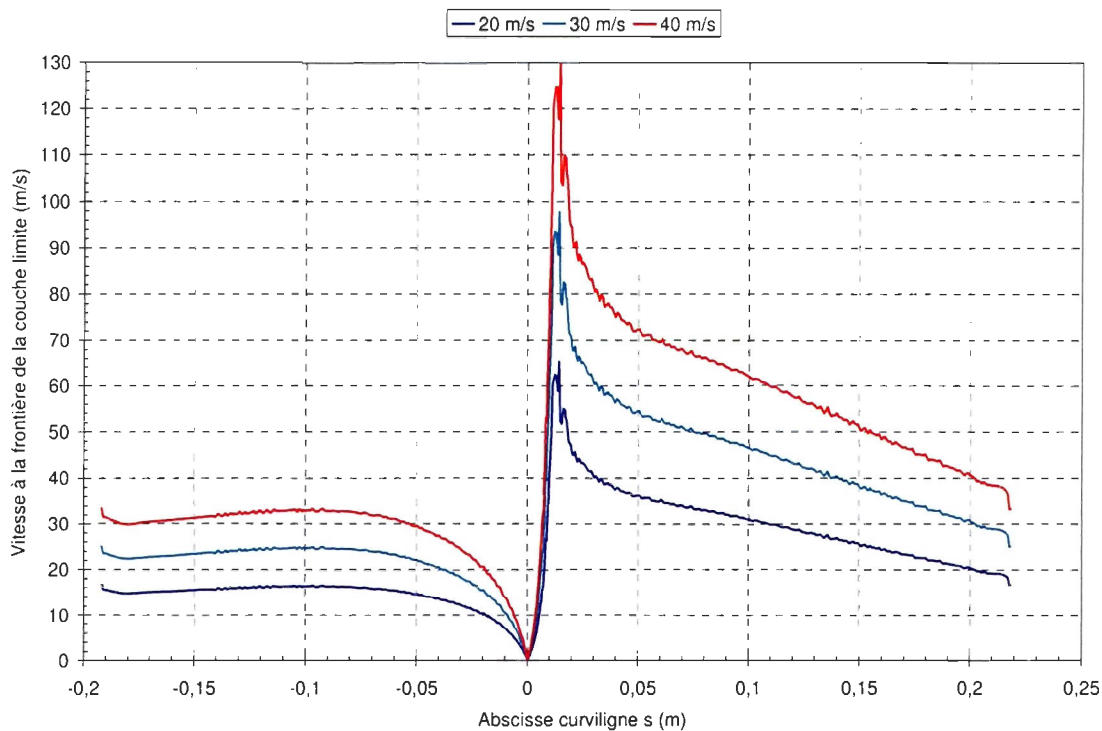


Figure 4-1. Vitesse sur le profil dans la zone d'essai.

L'équation suivante caractérise la variation de la température à la frontière de la couche limite le long du profil :

$$T_{\infty} + \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{rel}^2}{c_{p_{air}}} = T_{CL} + \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{couche\ limite}^2}{c_{p_{air}}} = cste \quad (43)$$

T_{∞} est la température de l'écoulement non perturbé. Elle correspond à la température dans la soufflerie à l'entrée de la zone d'essai. T_{CL} est la température à la frontière de la couche limite. Elle s'écrit :

$$T_{CL} = T_{\infty} + \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{rel}^2}{c_{p_{air}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{couche\ lim}^2}{c_{p_{air}}} \quad (44)$$

L'évolution de T_{CL} est donnée à la Figure 4-2 pour chaque vitesse de test.

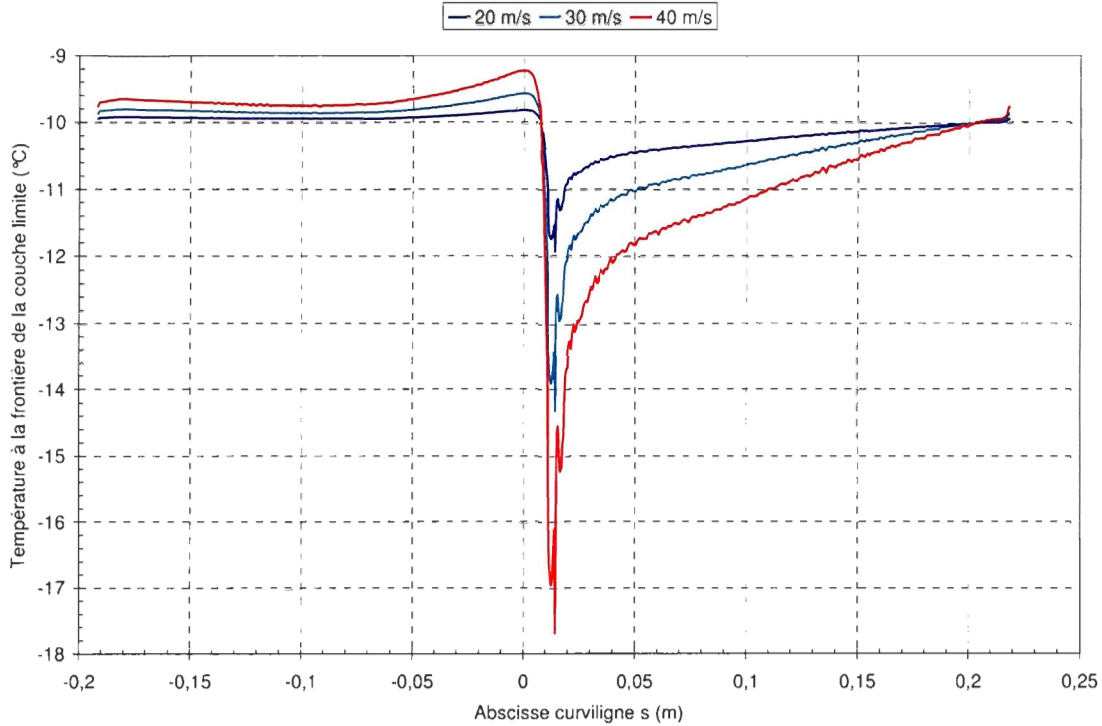


Figure 4-2. Température à la surface du profil dans la zone d'essai.

Le coefficient de transfert de chaleur convectif est calculé avec le logiciel LIMAicing2D sur toute la surface du profil. Il peut ainsi être comparé avec la valeur utilisée lors des expériences du Chapitre 3. La différence entre le calcul du Chapitre 2 (section 2.3.3), utilisé pour le dégivrage et le calcul effectué par le logiciel LIMA Icing2D réside dans les valeurs de la vitesse et du nombre de Stanton utilisés pour calculer le coefficient de transfert de chaleur (équation 44).

$$h_{cv} = \rho_{air} \cdot c_{p_{air}} \cdot U \cdot St \quad (45)$$

La vitesse utilisée dans le chapitre 2 est la vitesse moyenne de l'air dans la soufflerie alors que la vitesse utilisée par le logiciel est la vitesse à la frontière de la couche limite, présentée à la Figure 4-1. Le nombre de Stanton est calculé dans le Chapitre 2 :

$$St = \frac{1}{2} \cdot c_f \quad (46)$$

Cette relation est valable d'après Schlichting [38] pour les couches limites thermiques en écoulement laminaire. De plus, pour les écoulements de couche limite en régime turbulent, il existe une relation entre le transfert thermique et le coefficient de frottement qui a été découverte, dans sa forme la plus simple, par O. Reynolds en 1874, d'où son nom d'analogie de Reynolds. Pour une

plaque plane sans rugosité, les coefficients de frottement local c_f' et global c_f s'expriment comme suit :

$$c_f'(x) = \frac{0.0576}{(\text{Re}_x)^{0.2}} \text{ et } c_f = \frac{0.072}{\text{Re}^{0.2}} \quad (47)$$

Le logiciel LIMA Icing2D utilise l'analogie de Chilton-Colburn pour calculer le nombre de Stanton en régime laminaire et l'analogie modifiée de Dipprey, Sadersky, Owen et Thomson en régime turbulent [25]. La Figure 4-3 présente la variation du coefficient de transfert de chaleur le long du profil aérodynamique calculée avec le logiciel LIMA Icing2D.

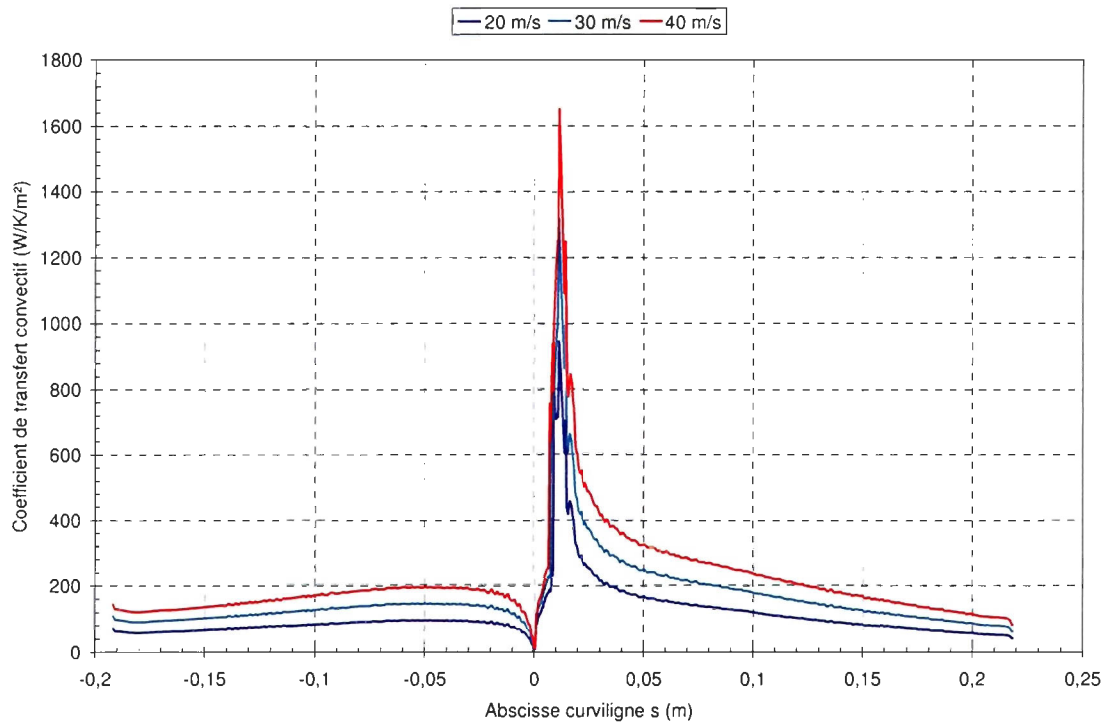


Figure 4-3. Coefficient de transfert de chaleur convectif calculé par LIMA Icing2D.

Ces courbes peuvent être comparées avec les valeurs utilisées lors des essais et rappelées au Tableau 4-1. Les thermocouples sont situés aux positions $s = 0.1873 \text{ m}$, $s = 0.0254 \text{ m}$, $s = -0.0127 \text{ m}$, $s = -0.1873 \text{ m}$. Le coefficient de chauffage est proche du coefficient de transfert de chaleur par convection calculé par le logiciel.

Tableau 4-1. Valeurs de h_l utilisées pour les essais.

N° essai	1-10-1	1-10-2	1-10-3	2-10-1	2-10-2	2-10-3	3-10-1	3-10-2	3-10-3	3-10-4
Vitesse d'écoulement (m/s)	20	20	20	30	30	30	40	40	40	40
Température cible T_c sur le bord d'attaque (°C)	1	1	5	1	1	10	1	10	15	15
h_l (W/po²/K)	0,6	0,6	0,6	0,9	0,8	0,9	1,1	1,1	1,5	1,5
h_l (W/m²/K)	930	930	930	1395	1240	1395	1705	1705	2325	2325
hcv max LIMAicing2D (W/m²/K)	947			1320			1650			

La différence entre les valeurs moyennes utilisées pour les essais et les valeurs locales obtenues avec le logiciel LIMAicing2D est très faible. Cependant la valeur du logiciel indiquée dans le Tableau 4-1 est la valeur maximale. Les autres valeurs peuvent être optimisées compte tenu de la variation de la vitesse locale et de la température locale le long du profil. Il est donc recommandé d'ajuster les paramètres de commande du système de chauffage pour tenir compte de la variation réelle du coefficient de transfert de chaleur le long du profil.

4.2 Flux thermique dirigé vers l'intérieur du profil

Une partie de l'énergie dissipée par l'élément chauffant est perdue par conduction vers l'intérieur du profil. Afin d'estimer cette perte énergétique, le flux thermique est calculé à travers l'épaisseur du profil à l'aide de la différence de température entre la face externe du profil et sa face interne. Grâce aux thermocouples situés sur la face interne du profil, en vis-à-vis des thermocouples extérieurs qui contrôlent le chauffage, le flux thermique peut être estimé. Le flux de chaleur se calcule à l'aide de l'équation générale de transfert thermique conductif en régime permanent :

$$\varphi = \frac{\lambda}{e} \cdot (Th_e - Th_i) \quad (48)$$

D'une manière conventionnelle, on donne une valeur positive au flux de Th_e vers Th_i lorsque $Th_e > Th_i$ [42]. Les températures moyennes mesurées durant les essais expérimentaux (Tableau 3-12) sont utilisées pour calculer le flux dirigé vers l'intérieur du profil, autrement dit, les pertes thermiques du chauffage. Le coefficient de conductivité thermique à travers la fibre de verre est

compris entre 0.2 et 0.3 W/(m.K) (documentation technique en Annexe A). La valeur de 0.3, la plus critique, est utilisée pour les calculs. L'épaisseur du profil est de 1.96 mm (section 2.1.3). Les résultats sont fournis dans le Tableau 4-2.

Tableau 4-2. Flux thermique moyen à travers le profil.

N° essai	1-10-3				2-10-3				3-10-3			
Vitesse (m/s)	20				30				40			
Température (°C)	-10				-10				-10			
N° élément chauffant	0	3	1	2	0	3	1	2	0	3	1	2
Différence de température (valeur absolue) (°C)	2.62	1.58	1.75	0.05	5.11	1.58	2.19	0.12	3.86	0.69	2.98	3.74
Flux thermique à travers l'épaisseur (W/m²)	401.02	241.84	267.86	7.65	782.14	241.84	335.20	18.37	590.82	105.61	456.12	572.45
Puissance moyenne consommée (W/m²)	2554.26	2065.89	1830.43	1372.09	3872.09	2945.74	2924.42	2127.91	5645.35	3250.00	3777.13	2352.71

Globalement, les pertes thermiques vers l'intérieur du profil sont négligeables. Sur le montage, elles sont de l'ordre du milliwatt ce qui est insignifiant en comparaison de la puissance électrique fournie par les éléments chauffants pour le dégivrage qui est de l'ordre de 2 à 10 watt (Tableau 3-13). En termes de flux surfacique, les pertes sont de l'ordre de la centaine de watt alors que le chauffage est de l'ordre du millier de watt (Tableau 4-2).

Laakso et Peltola [14] affirment que la température de surface de la pale qui est chauffée par des éléments chauffants ne dépend ni de la taille de la pale ni de son épaisseur lorsque la puissance de chauffage est suffisante, ce qui soutient les résultats de la présente section.

4.3 Résultat global pour la pale

L'estimation des pertes de puissance pour une éolienne est délicate. Les résultats obtenus permettent d'estimer l'évolution du givrage et des besoins de dégivrage pour une pale complète. Certaines informations en particulier peuvent être interprétées. Elles sont détaillées dans cette section. Les trois essais réalisés à des vitesses de vent différentes (20, 30 et 40 m/s), mais pour des conditions météorologiques identiques (LWC, MVD, taux d'accrétion, température de l'air) correspondent à trois positions radiales sur une pale en rotation et permettent de tirer certaines

conclusions sur le comportement d'une pale d'éolienne réelle. En particulier, l'évolution des formes de givre le long de la pale est un élément important dans la conception du système de dégivrage.

4.3.1 Résultats aérodynamiques

Les résultats obtenus par différentes études, détaillés au Chapitre 1, concluent toutes que l'accumulation de glace la plus néfaste aux propriétés aérodynamiques des pales est celle qui a lieu sur le bord d'attaque. Le système de dégivrage tel qu'il est conçu permet de dégivrer complètement le bord d'attaque. Tout ceci laisse supposer que même si une petite partie seulement de la pale est dégivrée, les propriétés aérodynamiques seront nettement améliorées.

4.3.2 Évolution des masses de glace accumulées

La masse de glace accumulée sur le profil est une indication de l'importance du givrage. Lors des essais, l'accumulation n'est pas régulière sur toute la largeur du profil en raison, en particulier, du nombre limité de gicleurs et de l'impact des bords de la section d'essai. De plus, lors des tests de dégivrage, cette donnée est malheureusement inexploitable du fait de la discontinuité des éléments chauffants sur la largeur du profil.

Les masses de glace accumulées lors des essais de givrage à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ sont présentées à la Figure 4-4. La reproductibilité est démontrée avec une disparité des résultats comprise entre 0 et 7 %.

La Figure 4-5 présente l'évolution de l'accumulation de glace estimée à partir des résultats de la Figure 4-4 pour une pale de 40 m telle que celle présentée au Chapitre 2 à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et sous un vent de 8 m/s. Compte tenu de la mise à l'échelle réalisée, les résultats de la Figure 4-4 sont multipliés par le rapport de corde (c_r/c_s) fournissant ainsi une estimation de la masse de glace accumulée sur la pale réelle dans les conditions de l'expérience (teneur en eau liquide réelle de 0.218 g/m^3).

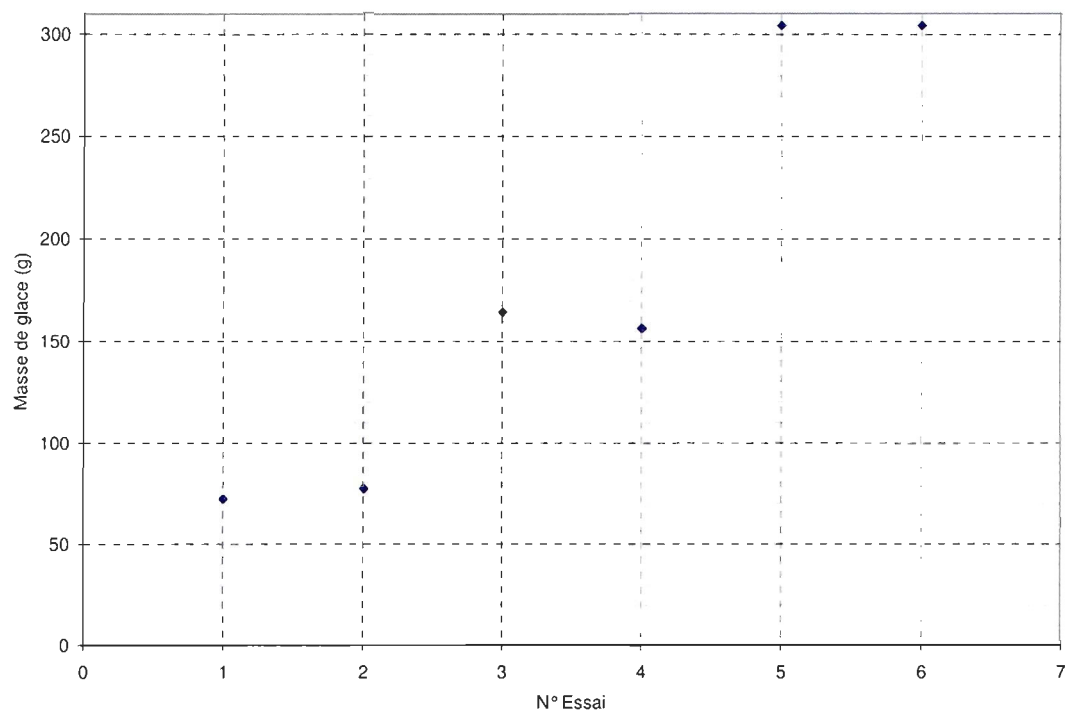


Figure 4-4. Masse de glace accumulée lors des essais de givrage à -10 °C.

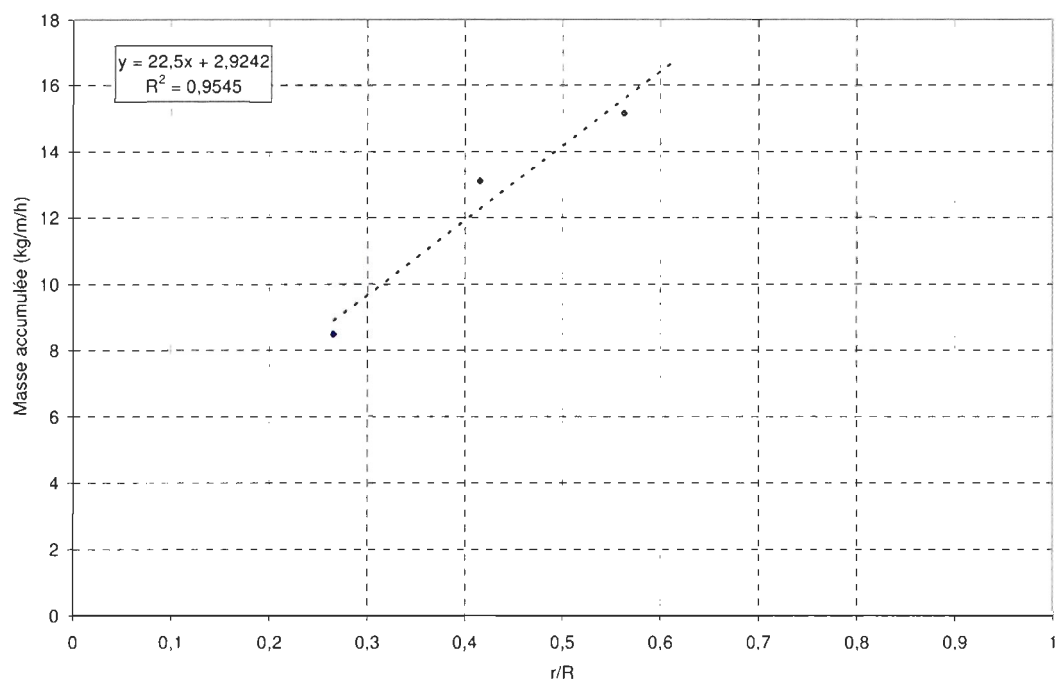


Figure 4-5. Évolution de l'accumulation de glace sur la pale à -10 °C.

Ce résultat rejoint la plupart des observations faites sur des pales d'éoliennes givrées en opération, qui montrent que l'accumulation de glace augmente linéairement sur la deuxième moitié de la pale avec la masse la plus importante en bout de pale (voir Figure 4-6 et Figure 4-7)



Figure 4-6. Évolution de l'accumulation de glace sur une pale [28]

Par ailleurs, la glace accumulée en bout de pale se détache en cours de fonctionnement si l'éolienne n'est pas arrêtée et grandit à nouveau formant une répartition en dents de scie [28].

Les résultats expérimentaux de ce mémoire sont comparés avec ceux du Finnish Meteorological Institute qui présente une étude sur les éoliennes en climat froid (voir Figure 4-7) et en particulier une analyse des résultats du système électrothermique de dégivrage JE-System [6]. L'évolution de l'accrétion de glace augmente linéairement à partir de $r = 0.4 \cdot R$ et jusqu'au bout de la pale.

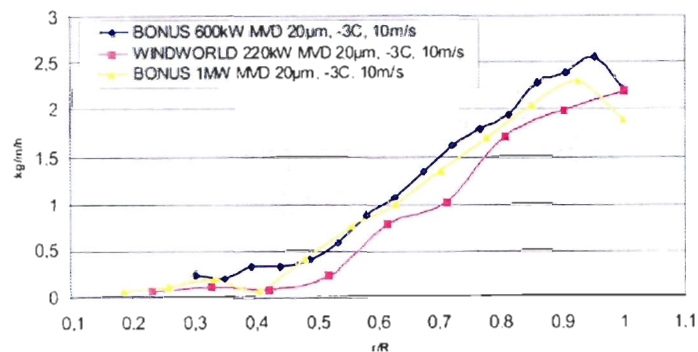


Figure 4-7. Évolution du taux d'accumulation de glace d'après le logiciel TURBICE [6].

Les résultats de l'étude réalisée dans ce mémoire de même que l'étude du Finnish Meteorological Institute démontrent bien que l'accrétion de glace augmente linéairement avec l'augmentation du rayon de pale et donc que plus les éoliennes ont un diamètre important, plus le dégivrage est difficile. Le changement de pente de la courbe d'accumulation de givre pour la section de pale inférieure à $0.4 \cdot r/R$ illustre la diminution de l'effet de rotation de la pale sur le givrage. Sur le

premier tiers de la pale, la faible vitesse tangentielle de rotation (U_{tan}) induit une faible accumulation de glace.

4.3.3 Formes de glace

Les formes de glace accumulées sur le profil à l'issue des essais à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ sont présentées au Chapitre 3 (section 3.11.4). La Figure 4-8 présente la position sur la pale correspondant aux essais réalisés. Des cornes se forment sur le bord d'attaque car le régime d'accrétion passe d'un régime sec à un régime humide. L'augmentation de l'épaisseur de glace, de la taille des cornes sur le bord d'attaque ainsi que de la rugosité de surface permet de quantifier les besoins énergétiques pour le dégivrage le long de la pale.

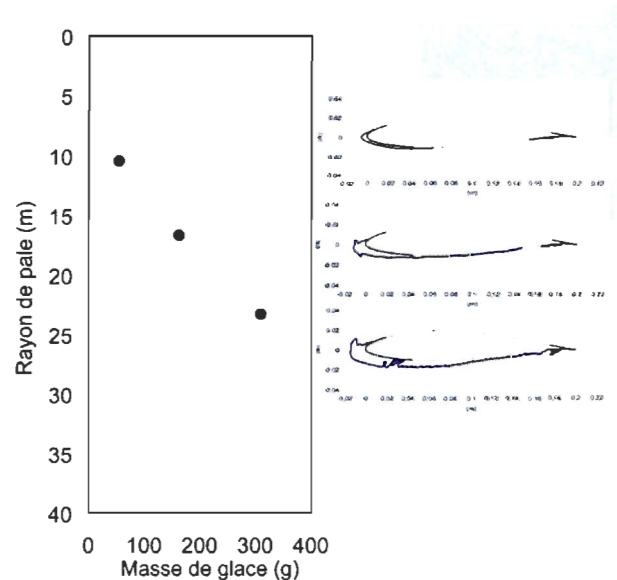


Figure 4-8. Forme des dépôts de glace le long de la pale.

Ces résultats sont comparés avec ceux de Hochart [25]. Il a réalisé des essais avec une teneur en eau liquide de 0.218 g/m^3 , une température de $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ et une vitesse de vent de 8.8 m/s . La durée de l'évènement de givrage est de 6 h. Mises à l'échelle, ces conditions deviennent celles du Tableau 4-3.

Tableau 4-3. Conditions expérimentales de Hochart [25].

r	α	LWC	MVD	U_{rel}	T_{amb}	t
11.9	13	0.37	27.6	19.9	-1.4	14.8
23.4	13	0.48	27.6	38.0	-1.4	15.1
34.8	13	0.48	27.6	56.0	-1.4	24.8

L'essai a lieu en régime humide et donne du verglas, alors que l'expérience à -10 °C présentée dans ce mémoire a lieu en régime sec. La Figure 4-9 peut ainsi être comparée avec la Figure 4-8. La forme de l'accumulation varie entre les deux figures mais pas sa localisation sur le profil.

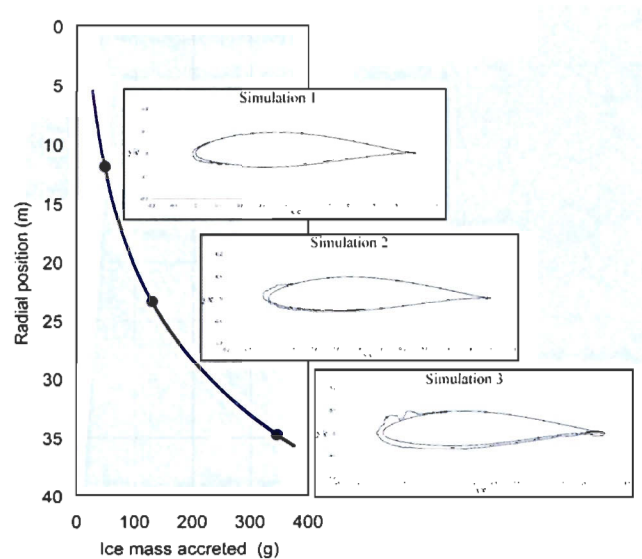


Figure 4-9. Masse et formes des dépôts de glace en régime humide [25].

Les essais de dégivrage, tels que présentés au Chapitre 3 (section 3.11) donnent les formes d'accrétion présentées à la Figure 4-10. Le dégivrage fait fondre la glace et crée un film d'eau qui ruissèle et regèle sur la partie non dégivrée de la pale. En raison de la masse d'eau collectée plus importante en bout de pale, la quantité de glace qui se forme à cause du ruissèlement augmente.

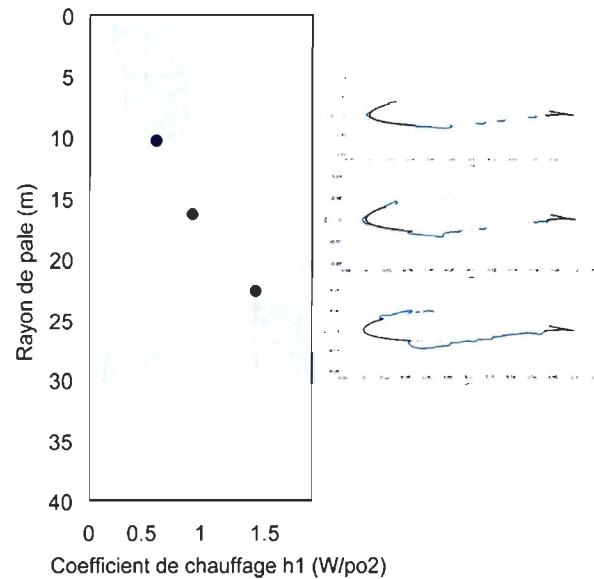


Figure 4-10. Formes des dépôts de glace en régime sec avec dégivrage.

La force centrifuge qui agit sur l'eau et la glace sur une éolienne, mais qui n'a pas été reproduite dans la soufflerie, peut accentuer ce phénomène.

4.3.4 Pertes de puissance des pales avec et sans dégivrage

Plusieurs articles évoquent les pertes de puissances des éoliennes givrées ([14] et [43]). Les données chiffrées ne sont pas toujours identiques mais des pertes de puissance sont observées dès le démarrage de l'éolienne givrée et ce, même si la couche de givre est mince. Ces pertes peuvent aller jusqu'à 30% de diminution des performances de production aux plus grandes vitesses de vent.

Le projet WECO (Wind Energy production in Cold climate [11]) utilise les caractéristiques aérodynamiques estimées en soufflerie pour différentes sections de pale givrées sur différentes éoliennes. Par exemple, la Figure 4-11 présente les résultats de calculs réalisés pour une éolienne de 500 kW à décrochage aérodynamique avec différentes quantités de givre sur le bord d'attaque.

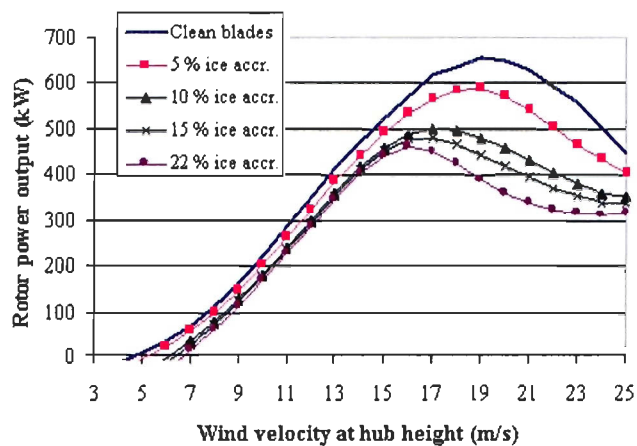


Figure 4-11. Production de puissance calculée pour une éolienne de 500 kW [43].

Les baisses de production augmentent à mesure que la quantité de glace sur le bord d'attaque est accrue. Elles sont significativement plus importantes à partir de 14 m/s de vitesse de vent.

La Figure 4-12 présente une estimation de la puissance produite selon l'accumulation de glace visible sur les bords d'attaque de la légende. Les calculs sont réalisés pour une éolienne de 300 kW à calage variable.

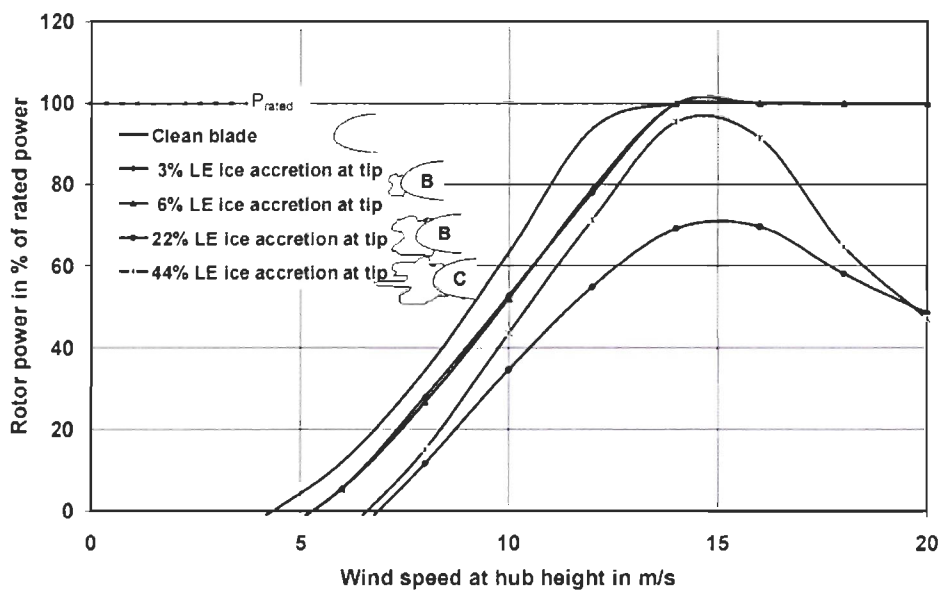


Figure 4-12. Courbe de puissance de profils givrés.

La section 4.4 fait état de la consommation de puissance du système de dégivrage qui peut être mise en parallèle avec les pertes de puissance des éoliennes givrées présentées dans la présente section. Les deux études ci-dessus démontrent que les pertes de production peuvent aller jusqu'à 50 % de la capacité de l'éolienne pour les plus grandes vitesses de vent. Pour les plus petites vitesses de vent, les pertes atteignent 20 à 30 %. C'est donc la consommation maximale acceptable pour le système de dégivrage. Pour la Vestas V80 de 1.8 MW, la consommation maximale acceptable d'un tel système est donc de 360 à 540 kW.

La section 4.5 détaille les pertes de puissance des pales munies du JE-System, le seul système de dégivrage électrothermique actuellement commercialisé et utilisé sur des éoliennes.

4.4 Estimation de consommation de puissance du dégivrage

La puissance consommée par le système lors des essais en soufflerie est donnée au Chapitre 3 (section 3.11.3). Compte tenu de la similitude réalisée (section 3.1.3), la consommation d'un système de dégivrage électrothermique à l'échelle d'une éolienne peut être estimée.

L'évolution de la consommation de puissance des éléments chauffants sur la pale est estimée à partir des résultats aux trois positions testées en soufflerie (10.6 m, 16.6 m et 22.5 m). Les éléments chauffants doivent avoir une puissance surfacique plus importante en bout de pale qu'au niveau du rotor. L'accumulation de glace sur le premier tiers de la pale est limitée et cette portion de pale participe peu à la production de l'éolienne. Par conséquent, le dégivrage de cette section est d'une utilité réduite. La puissance nécessaire pour les éléments chauffants 2 et 3, situés dans la zone du bord de fuite du profil, est limitée et relativement constante sur la longueur de la pale puisque c'est le bord d'attaque qui reçoit le plus de gouttelettes d'eau et subit la plus importante vitesse de vent. La Figure 4-13 présente les résultats obtenus par les tests de dégivrage en soufflerie pour les essais avec une température cible de 1 °C. Les données sont celles du Tableau 3-13.

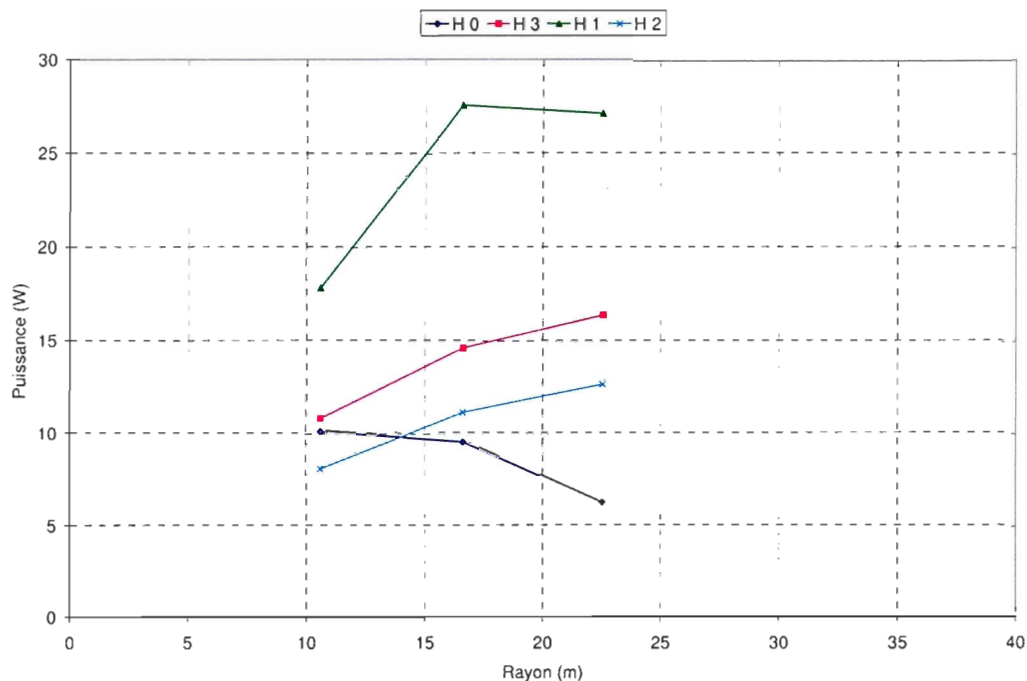


Figure 4-13. Évolution de la puissance moyenne consommée par les éléments chauffants.

Les éléments chauffants de l'extrados consomment plus d'énergie que ceux de l'intrados en raison de la zone de séparation importante. L'élément chauffant H1 consomme deux fois plus d'énergie car il est deux fois plus grand que les autres, mais son intensité surfacique de chauffage est du même ordre de grandeur que les autres. La diminution de consommation de puissance de l'élément chauffant H0 s'explique par la présence d'une corne de glace lors de l'essai 3-10-1 (à 40 m/s et -10 °C) qui isole le thermocouple $Th_e 0$ de l'impact du vent. Il en est de même pour l'élément chauffant H1 dans une moindre mesure. Ce phénomène est visible à la Figure 4-14 et est également observé par Makkonen et al. [7] lors de simulations faites avec le logiciel TURBICE.

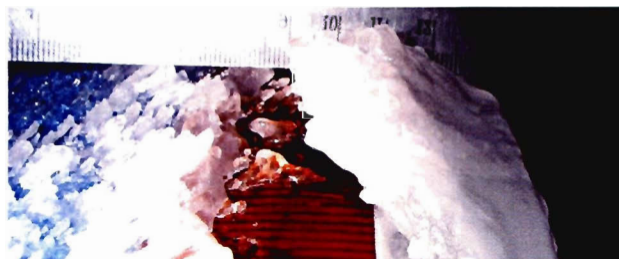


Figure 4-14. Thermocouple $Th_e 0$ isolé de l'écoulement par une corne de glace.

La Figure 4-15 présente les mêmes résultats lorsque les températures cibles T_C du bord d'attaque ont été augmentées pour obtenir un meilleur dégivrage (voir section 3.6 sur l'optimisation du calcul de la puissance). La température cible des éléments chauffants H2 et H3 est de 1 °C, comme dans l'essai précédent (Figure 4-13) mais la température cible des éléments chauffants H0 et H1 est augmentée à 15 °C pour améliorer la qualité du dégivrage.

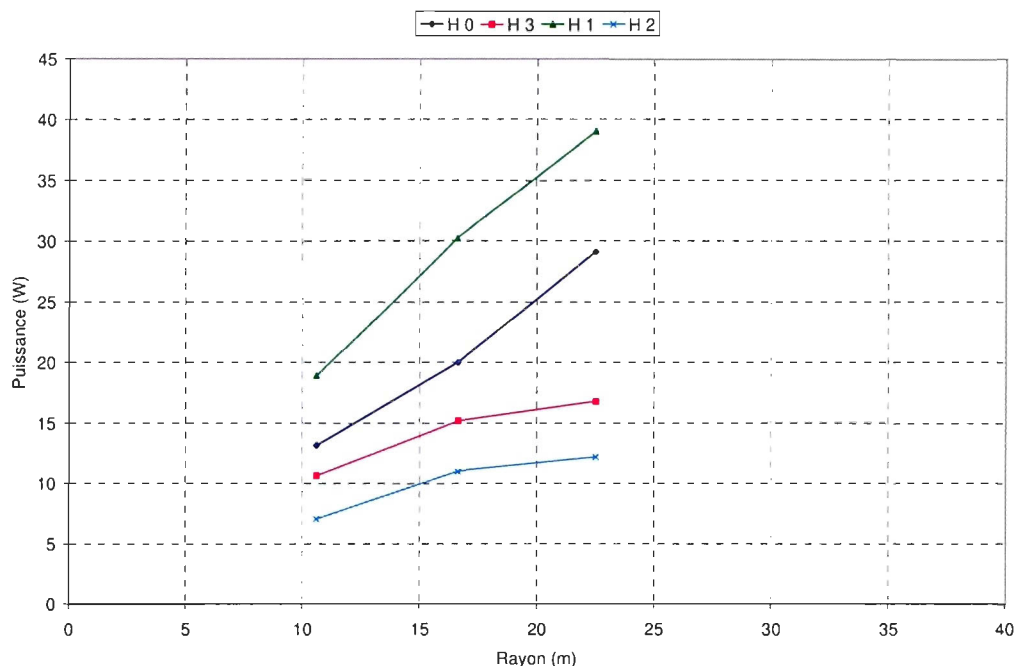


Figure 4-15. Évolution de la puissance moyenne consommée par les éléments chauffants.

Les résultats obtenus pour une vitesse d'écoulement non perturbé de 8 m/s, une température de -10 °C et une teneur en eau de 0,4 g/m³ montrent que l'amélioration de la qualité du dégivrage s'accompagne d'une augmentation de la consommation de puissance, ce qui était aisément prévisible. L'augmentation de consommation de puissance de H1 varie de 5,3 à 30,3 % entre les essais à 20 m/s et 40 m/s. Puisque le dégivrage est de meilleure qualité, le thermocouple $Th_c 1$ n'est plus isolé de l'écoulement et la consommation de puissance de l'élément chauffant H0 augmente de 23,1 à 78,6 % entre l'essai à 20 m/s et celui à 40 m/s.

Le dégivrage consiste à maintenir la surface de la pale à une température positive (la température cible T_C dans l'idéal) et à combattre les pertes thermiques par convection. Ainsi, l'expression de la puissance de chauffage est :

$$P = h_1 \cdot A \cdot (T_\infty - T_C) + h_1 \cdot A \cdot (T_S - T_C) \quad (49)$$

L'aire des éléments dépend de leur largeur l et de la corde c (leur longueur est une fraction de la corde). L'expression du coefficient de transfert de chaleur est rappelée :

$$h_1 = \rho_{air} \cdot c_{p_{air}} \cdot U \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{0.058 \cdot \mu_{air}^{0.2}}{(\rho_{air} \cdot U \cdot c)^{0.2}} \quad (50)$$

Ce coefficient dépend en particulier de la vitesse et de la corde, qui interviennent dans la mise à l'échelle. Par conséquent l'équation suivante met en relation la puissance de dégivrage dans la soufflerie P_S et celle du système réel P_R , compte tenu des égalités entre les paramètres qui n'interviennent pas dans la similitude :

$$\frac{P_R}{P_S} = \left(\frac{U_R}{U_S} \right)^{0.8} \cdot \left(\frac{c_R}{c_S} \right)^{0.8} \cdot \left(\frac{l_R}{l_S} \right) \quad (51)$$

Les rapports de similitude sont donnés au Tableau 4-4.

Tableau 4-4. Rapports de similitude.

	Rapport des Vitesses	Rapport des Cordes	Rapport des Longueurs
Essai à 10 m/s	1	13,5	$lr/0,193$
Essai à 20 m/s	1	11,5	$lr/0,193$
Essai à 30 m/s	1	9	$lr/0,193$

Compte tenu de ces rapports, il reste à fixer la largeur des éléments chauffants de puissances surfaciques différentes le long de la pale pour obtenir la consommation de puissance du système de dégivrage ainsi conçu.

Par exemple, une solution de système de dégivrage pour les éoliennes VESTAS V80 installées sur le site de Murdochville est décrite ici. Les différentes zones de la pale pour lesquelles l'intensité du chauffage est constante sont illustrées à la Figure 4-16.

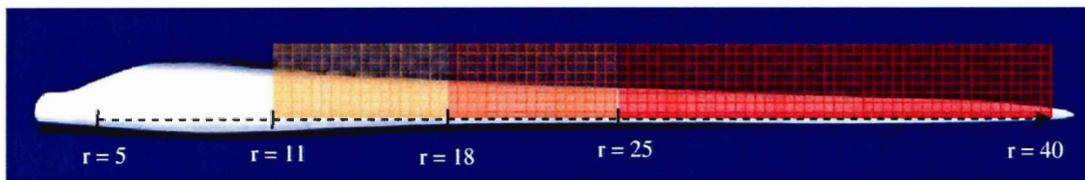


Figure 4-16. Zones de chauffage sur la pale.

L'intensité de chauffage des différentes zones est donnée à la Figure 4-17 d'après les résultats de cette étude.

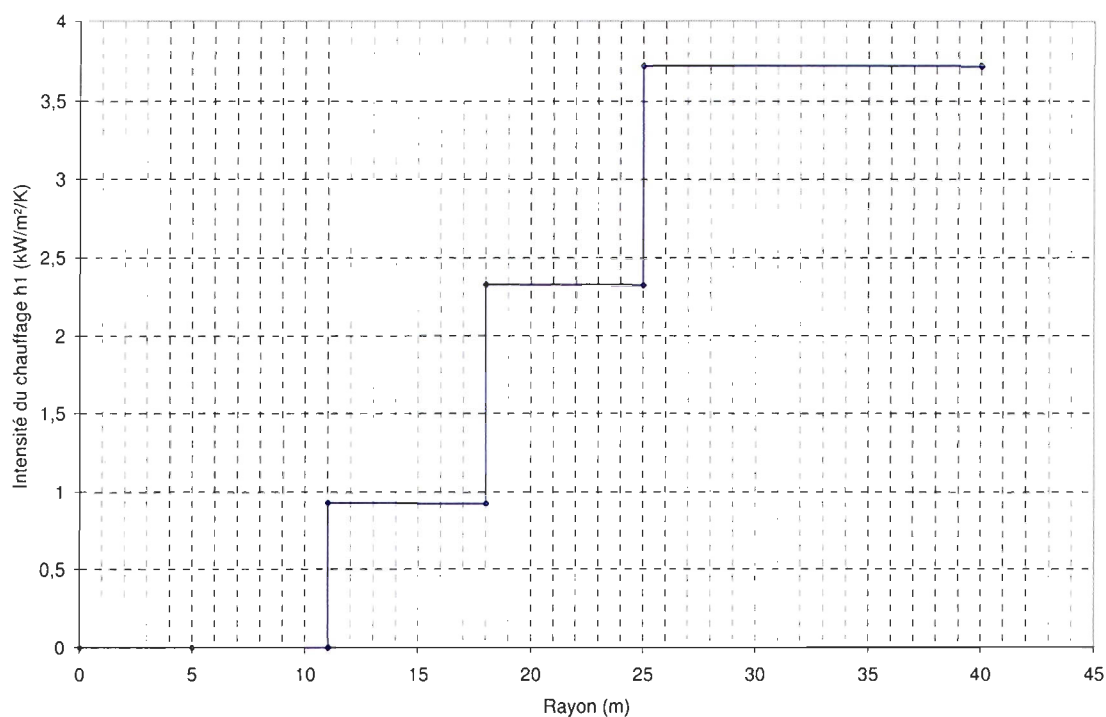


Figure 4-17. Répartition du chauffage le long de la pale.

Pour la Vestas V80 de 1.8 MW, un tel système de dégivrage consommerait approximativement 82 kW, soit 13.7 % de la puissance de l'éolienne à la vitesse considérée de 8 m/s. Une étude à l'échelle devra être réalisée pour valider l'étendue des éléments chauffants et l'augmenter si nécessaire en bout de pale comme le suggèrent les résultats obtenus en soufflerie.

4.5 Le système de dégivrage JE-System

Le seul système de dégivrage par éléments chauffants développé commercialement est le JE-System fabriqué par la compagnie Kemijoki Arctic Technology (KAT) Oy (voir Figure 4-18).

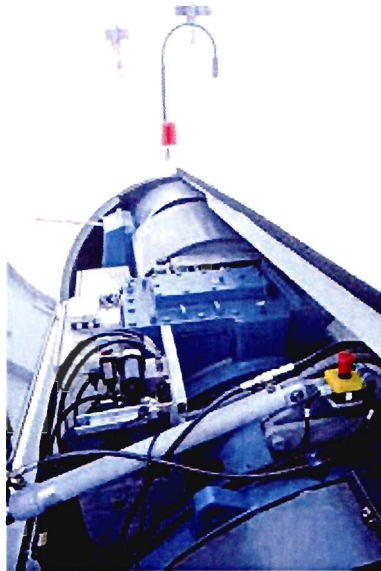


Figure 4-18. JE-System dans la nacelle d'une éolienne.

18 éoliennes ont été équipées de ce système dans des pays nordiques durant l'automne 2000 [7]. KAT fournit les services de planification, installation et maintenance pour les éoliennes en climat nordique. La compagnie développe et commercialise des composants spécialement adaptés à ces éoliennes, mais le JE-System est leur produit le plus connu [44]. Le rapport du Finnish Meteorological Institute décrit son fonctionnement et ses résultats [6].

4.5.1 Principe de fonctionnement

Le JE-System est un système contrôlé de prévention du givre qui est conçu quasiment exactement comme celui de l'étude de ce mémoire. Il est constitué d'éléments chauffants en fibre de carbone, d'un système de contrôle et d'un détecteur de glace. Les éléments chauffants sont intégrés dans le laminage de la surface de la pale lors de sa fabrication et recouvrent la zone du bord d'attaque de la pale [6]. Ils sont constitués d'un grillage résistant aux coupures qui fait en sorte que l'élément chauffant fonctionne même lorsqu'il est percé [44]. Un détecteur de givre et la température de surface de la pale contrôlent le fonctionnement du système et un capteur de dépassement de température est utilisé comme sécurité pour prévenir des dommages sur la pale au cas où un dysfonctionnement du contrôle électronique se produirait. Les éléments chauffants sont alimentés dès que du givre est détecté. Les capteurs de température situés juste en dessous des éléments

chauffants dans la structure de la pale sont alors utilisés pour contrôler la puissance de chauffage. Les éléments chauffants sont arrêtés dès que les détecteurs de givre enregistrent la fin de l'évènement de givrage [6].

La Figure 4-19 présente le fonctionnement du JE-System installé sur une des éoliennes à Pori (Finlande). Une augmentation de la vitesse du vent induit la mise en route d'un chauffage additionnel, d'où les pics de puissance sur le graphique.

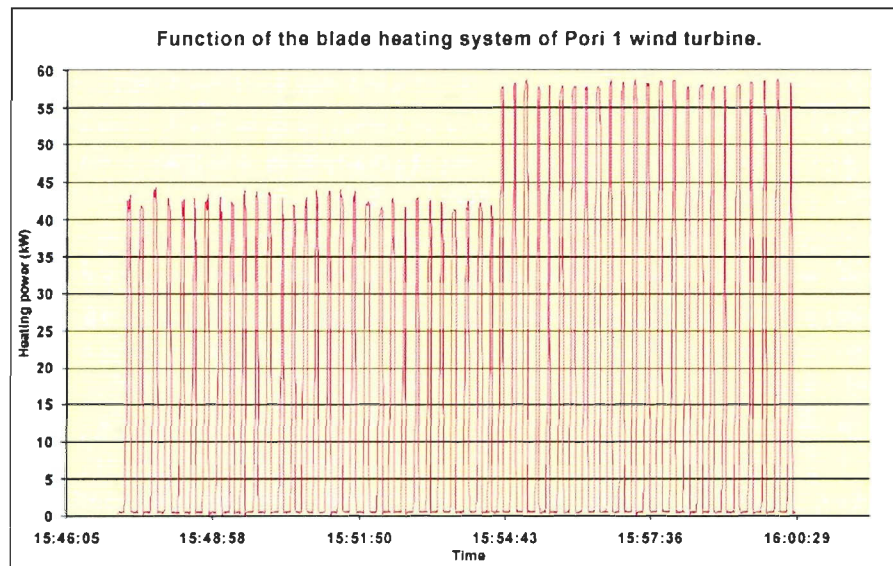


Figure 4-19. Fonctionnement du thermostat du JE-System (Taux d'échantillonnage 1 Hz) [45].

Cette figure peut être comparée à la Figure 3-8 qui présente les variations de puissance du système utilisé dans ce mémoire. Le principe de fonctionnement est le même, les résultats sont similaires. La puissance consommée par le système correspond aux différences de puissance entre l'air et la surface de la pale. Dans le cas des éoliennes installées à Pori, le thermostat est réglé à $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et les thermocouples sont situés le plus près possible des éléments chauffants [45]. Il est recommandé de réduire cette valeur au maximum ($+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ est suggéré) pour diminuer la consommation du système.

L'optimisation du système de chauffage suggère de réduire les pics de chauffage au profit d'un chauffage plus homogène et constant. La combinaison de cette modification du contrôle et de l'optimisation des paramètres du chauffage (température cible T_c et coefficient de chauffage h_1) doit

permettre à la fois d'améliorer la qualité du chauffage et de diminuer la consommation énergétique du système.

4.5.2 Utilisation et entretien du système

Le système antigivre ne nécessite pas de maintenance particulière différente que celle du reste de l'éolienne opérant en climat nordique. Cependant, les composantes électroniques, et en particulier les thermistors et thyristors sont sensibles à l'humidité et des défaillances électroniques ont été observées et corrigées ([6] et [45]). Par ailleurs, aucun bris n'a été enregistré suite aux impacts de foudre sur les éléments chauffants, relativement nombreux sur l'un des sites où a été installé le JE-System [45]. Un système parafoudre pour le système antigivre a été intégré dans le système parafoudre général de l'éolienne et a bien fonctionné. De plus, aucune observation ne laisse supposer que les éléments en fibre de carbone augmenteraient la sensibilité des pales à la foudre.

4.5.3 Performances du système

Le principal problème du système est la détection du givrage, évoquée dans la section « Recommandations ». En effet, la détection trop tardive du givre sur les pales laisse le temps à l'accumulation de glace pour diminuer significativement les performances de l'éolienne. Alors, la mise en marche du système de dégivrage n'est pas suffisante pour ramener la production de l'éolienne à sa valeur normale. Ce point est illustré sur la Figure 4-20.

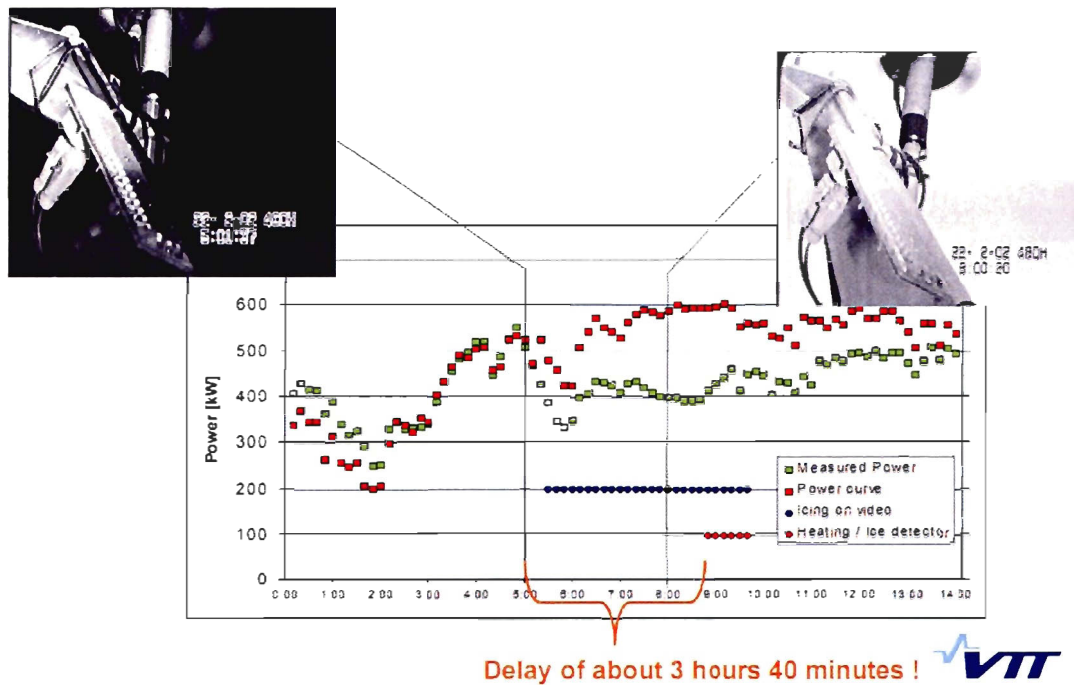


Figure 4-20. Évènement de givrage à Olostrunturi-fell (Nord de la Finlande) [43].

La détection efficace du givre est particulièrement importante afin de pouvoir démarrer le dégivrage avant que l'écoulement ne devienne complètement turbulent autour du profil. En effet, ce cas induit une consommation de puissance considérablement plus importante pour le dégivrage en raison du transfert de chaleur beaucoup plus élevé [6].

Les principales baisses d'efficacité du JE-System en cours de fonctionnement sont dues à des faiblesses dans le système hydraulique, des défaillances des anémomètres et du contrôle du système de chauffage [44].

Le chauffage des pales augmente la consommation d'électricité interne à l'éolienne, qui varie beaucoup en climat froid, en raison des changements de température hivernale d'une année à l'autre. Pour fins de comparaisons, la consommation d'énergie des éoliennes installées à Lapland (Finlande) est comprise entre 3 et 8 % de la production annuelle des turbines. À Pori (Finlande), sur les éoliennes de 1 MW soumises à des conditions climatiques plus douces, la consommation d'énergie interne est comprise entre 4 et 7 % de la production moyenne annuelle. La part du chauffage des pales est, quant à elle, comprise entre 1 et 2 % seulement de la production annuelle

([6] et [45]). La puissance maximale du système est de 58 kW pour les éoliennes de 1 MW à Pori [45]. La consommation d'énergie totale du système antigivre a été de 70 MWh seulement durant les cinq premières années d'opération à Suorva (Finlande) ce qui représente la moitié de l'énergie consommée sur le site de Vemhan (Rodovalen, Central Sweden) soit 2.3 % de la puissance produite. L'énergie consommée pour le chauffage des pales était de 0.8 % de la production de chaque éolienne à Suorva [6]. La Figure 4-21 présente les performances du système de dégivrage à Suorva durant le mois de novembre 2001. La rentabilité de l'utilisation du dégivrage est visible sur la figure : l'accumulation d'énergie, en noir, est positive.

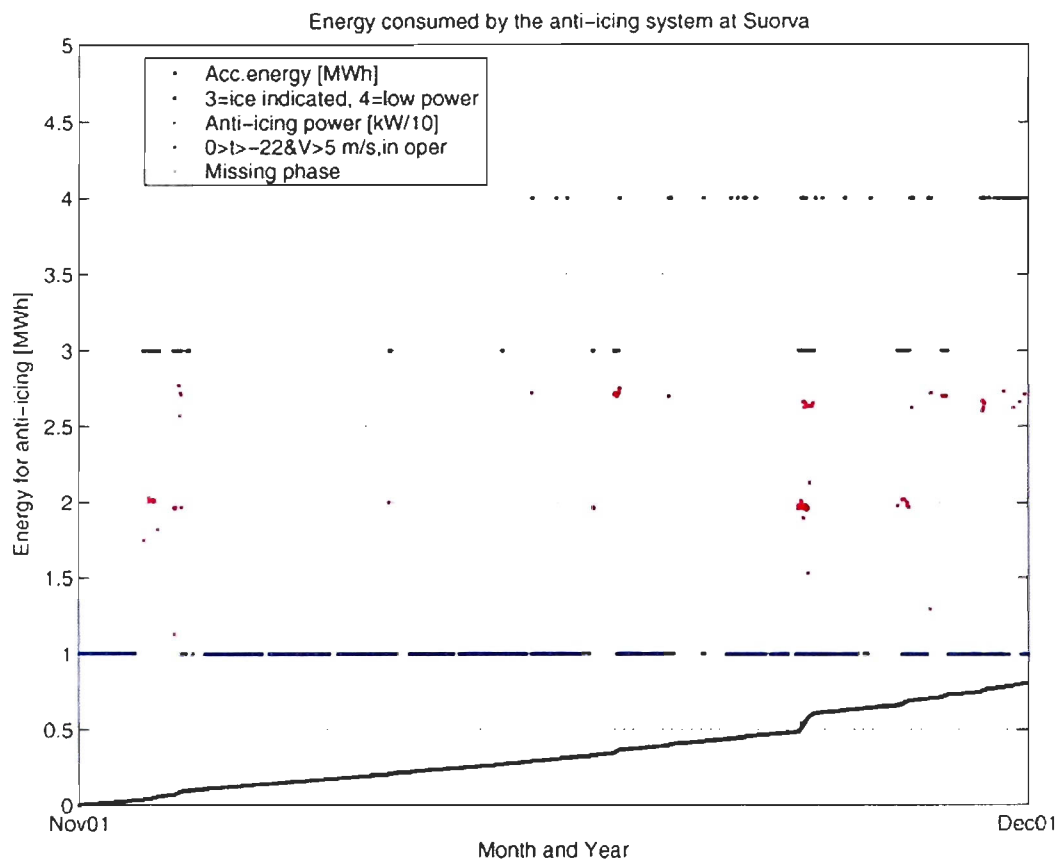


Figure 4-21. Consommation d'énergie du JE-System à Suorva (Finlande) [6].

L'étude théorique réalisée suite aux essais en soufflerie présente une consommation énergétique du système de dégivrage de 13.7 % de la production de l'éolienne. Sachant que l'étude est réalisée dans des conditions de givrage sévère, ces résultats sont très encourageants.

Les modifications structurelles de la pale causées par les éléments chauffants n'affectent pas les propriétés aérodynamiques de ces pales [45] et donc la performance des éoliennes n'est pas affectée le reste de l'année lorsqu'il n'y a pas de phénomène de givrage.

4.6 Limites et validité des résultats obtenus en soufflerie

La similitude réalisée pour pouvoir simuler le fonctionnement du système de dégivrage dans la soufflerie réfrigérée du LIMA implique une réduction importante des dimensions du montage expérimental par rapport au système réel. Par conséquent, l'interprétation des résultats à l'échelle est d'une précision limitée et nécessite une validation. Par exemple, les dimensions du profil, caractérisées par la corde sont réduites d'un facteur important, de l'ordre de 9 à 14 (Tableau 4-5).

Tableau 4-5. Rapport des dimensions du montage et de la pale.

N° test	U _{rel}	r	c réel	c scale	rapport de mise à l'échelle
1	20	10,6	2,7	0,2	13,5
2	30	16,6	2,3	0,2	11,5
3	40	22,5	1,8	0,2	9

Les conclusions concernant l'évolution du dégivrage le long de la pale en fonction des variations des conditions, en particulier de la vitesse relative du vent, sont probantes. L'optimisation du système de dégivrage, décrite au Chapitre 3 est très concluante. Même si elle devra être validée en conditions réelles, cette optimisation donne des résultats généraux très utiles pour comprendre le fonctionnement et la réponse d'un tel système.

Les résultats de ce mémoire sont validés par la comparaison réalisée dans le présent chapitre avec les autres études dans le domaine du dégivrage. En particulier, l'étude du Finnish Meteorological Institute est très importante et intéressante pour valider les résultats soutenus ici car elle concerne un système de dégivrage utilisant la même technologie.

4.7 Rentabilité du système

Le FMI [6] estime que sur les éoliennes situées en climat nordique, 43 % de toutes les erreurs techniques sont reliées à la sévérité du climat (baisse ou hausse de production, faible température, moment d'orientation élevé, système de dégivrage et faible niveau d'huile dû aux basses températures). Parmi toutes les erreurs, 13 % sont reliées au système de dégivrage lui-même (dysfonctionnements, bris électriques), ce qui représente une perte de production de 7 %. Cette valeur est à mettre en parallèle avec la consommation du système de dégivrage estimée à 13.7 % pour un cas de givrage très sévère.

La possibilité de développer un système de dégivrage rentable économiquement et énergétiquement est démontrée [14] et [6], mais il faut garder à l'esprit que des contraintes de sécurités, surtout en région urbaine, décrites au Chapitre 1, entrent souvent en ligne de compte dans la gestion des problèmes de givrage. De plus, le givrage en zone côtière, éoliennes offshore comprises, devient une problématique dès que la taille des éoliennes devient importante (>1 MW) en raison de l'élévation des rotors et de l'humidité ambiante [45].

Le cout d'un système de dégivrage est d'environ 5 % de l'investissement pour une éolienne de 600 kW. Pour les éoliennes de plus grande taille, cette proportion diminue en raison du cout du système en lui-même [14]. Pour les éoliennes évoluant dans des régions où le givre est léger, un système de dégivrage est difficilement rentable, mais il est parfois indispensable pour des raisons de sécurité [45].

CONCLUSION

La problématique du dégivrage des éoliennes et en particulier des pales est d'actualité. Elle comporte deux volets que sont d'une part l'amélioration de la viabilité et des performances de l'éolienne et d'autre part la sécurité de l'environnement de l'éolienne (humain et matériel). L'installation d'un système de dégivrage sur un site peut être motivée par l'une ou l'autre de ces contraintes, parfois les deux. Les technologies utilisées pour le dégivrage des pales proviennent généralement du domaine aéronautique et sont adaptées depuis plusieurs années aux contraintes d'opération différentes des pales d'éoliennes. Le choix du dégivrage électrothermique repose sur de nombreux points décrits au Chapitre 1, comme par exemple la simplicité d'installation sur une éolienne existante.

L'optimisation d'un système de dégivrage électrothermique par une étude expérimentale en soufflerie réfrigérée est l'objectif principal de cette étude. Le montage expérimental, c'est-à-dire l'instrumentation d'un profil aérodynamique et le contrôle par ordinateur du système de dégivrage, apporte de multiples informations sur le processus de givrage et de dégivrage électrothermique et permet de comprendre et donc d'optimiser le dégivrage. Les conditions expérimentales sont basées sur des enregistrements d'évènements de givrage observés par une tour de mesure et le montage expérimental repose sur les données techniques des éoliennes installées à proximité de la tour de mesure considérée, assurant une expérimentation réaliste. L'utilisation des mêmes matériaux que ceux utilisés dans l'industrie pour la fabrication de la section de pale assure les conditions d'opération les plus proches possibles des conditions d'exploitation réelles du système. L'installation d'une série de 8 thermocouples le long du profil, au centre de la section d'essai, a permis l'enregistrement et l'étude de différents phénomènes tels que la chaleur libérée par la solidification de l'eau. Le positionnement des éléments chauffants sur le bord d'attaque et sur le bord de fuite permet de déterminer l'étendue optimale permettant un bon dégivrage, et donc un maintien des propriétés aérodynamiques du profil, tout en assurant une consommation énergétique minimale. Le calcul du coefficient de chauffage, basé sur l'hypothèse d'une plaque plane, est détaillé. C'est la seule approximation de l'étude qui demande des approfondissements pour pouvoir optimiser davantage la consommation énergétique. L'étude des transferts thermiques mis en jeu au cours d'un évènement de givrage permet d'aboutir au calcul de la puissance électrique de chauffage

nécessaire. Les détails concernant la technologie de conversion de l'énergie vers les éléments chauffants de la section de pale sont fournis au Chapitre 2.

Un évènement de givrage enregistré par la tour de mesure météorologique de Murdochville (Est du Québec) a été mis à l'échelle d'après la méthode d'Anderson [40] pour être simulé en soufflerie sur le montage expérimental d'une section de pale d'éolienne. L'évolution de la température au cours des essais de givrage montre l'importance de l'énergie libérée par la solidification de l'eau. L'impact du givre sur le bord d'attaque et sur l'intrados en particulier s'explique par l'angle d'attaque important du profil (12°) par rapport à l'écoulement. L'évolution de la consommation de puissance montre la sensibilité du système à la température ambiante, ce qui permet d'assurer une bonne adaptabilité du système aux modifications des conditions d'opération. Les résultats importants obtenus ici pour la conception du système de dégivrage de l'éolienne concernent principalement l'évolution du dégivrage avec l'augmentation du rayon de pale et l'augmentation de la sévérité des conditions d'opération qui s'ensuivent. La surface recouverte par les éléments chauffants s'est avérée légèrement insuffisante à 40 m/s (22.5 m du rotor) sur l'intrados mais très satisfaisante à 20 et 30 m/s (10.6 et 16.6 m du rotor). Le taux d'accumulation de glace augmente linéairement avec le rayon de pale. La surface recouverte par le givre augmente également, surtout sur l'intrados, toujours en raison de l'angle d'attaque important des pales. Par conséquent, l'énergie fournie et l'étendue des éléments chauffants doivent être accrues lorsque l'on s'approche du bout de pale. La définition d'un nombre raisonnable de sections de pale, possédant des capacités énergétiques de dégivrage distinctes et contrôlées indépendamment est une solution idéale pour satisfaire au compromis nécessaire entre le coût et la qualité du dégivrage.

L'impact de la glace accumulée sur les propriétés aérodynamiques est un point important pour la production de l'éolienne. Les résultats de Hochart [25], Seifert et Richert ([27] et [28]) donnent des informations précieuses à propos de l'impact de la glace accumulée sur les propriétés aérodynamiques des profils et en particulier soutiennent l'hypothèse que le givre sur le bord d'attaque constitue une part importante de la réduction des propriétés aérodynamiques et donc une zone à dégivrer en priorité. Le Finnish Meteorological Institute (FMI) a étudié un système de dégivrage électrothermique commercialisé par une société finlandaise basé sur la même technologie que le montage étudié ici. Les résultats expérimentaux obtenus dans ce mémoire sont comparés à ceux du FMI [6].

L'installation d'un système de dégivrage électrothermique sur un parc éolien requiert une étude préalable pour estimer sa rentabilité. Cependant, le choix d'installer un système de dégivrage ne doit pas être motivé par les seules considérations de performances mais aussi par les problèmes de sécurité. Les pertes de production dues au givrage des pales et éventuellement à l'arrêt total des éoliennes peuvent mettre en danger la viabilité économique d'un projet éolien. Comme l'impact du givrage sur la production éolienne dépend beaucoup des conditions climatiques locales, ces conditions doivent être étudiées avec soin pour être prises en compte dans l'estimation des pertes de production d'un site. C'est pourquoi les campagnes de mesure météorologiques préalables à l'installation d'un parc éolien doivent comporter un volet sur le givrage dans les régions où ce problème pourrait se poser.

RECOMMANDATIONS

En vue d'une deuxième étude du concept et éventuellement de l'installation sur une éolienne du système de dégivrage électrothermique, diverses recommandations peuvent être formulées qui découlent des résultats détaillés dans ce mémoire.

Tout d'abord, une deuxième approximation de h_1 , plus fine que celle d'une plaque plane, qui prendrait en compte la variation du coefficient de frottement le long du profil est nécessaire pour valider l'optimisation du coefficient h_1 qui est une valeur clé dans le système de contrôle de la consommation d'énergie. Les résultats de LIMA Icing2D à ce sujet vont dans cette voie. De plus, l'utilisation de la température de la surface interne du profil, plus stable que celle de la surface externe, pour le calcul de la puissance devrait rendre le système globalement plus stable et constant.

L'évolution des résultats obtenus en soufflerie avec l'augmentation de la vitesse relative permet d'émettre des hypothèses quant aux résultats grandeur réelle. L'installation du système de dégivrage testé en soufflerie sur une éolienne instrumentée et munie d'une tour de mesure météorologique permettant d'enregistrer les données de givrage (teneur en eau liquide, diamètre volumétrique médian des gouttelettes, durée de l'évènement de givrage) confirmera ces hypothèses.

Le problème de la détection du givre pour la mise en route du dégivrage n'a pas été étudié ici. C'est cependant un point capital pour le dégivrage électrothermique qui doit être mis en route si et seulement si un besoin est détecté. Les appareils de détection du givre ne sont, en général, pas fiables à 100%. Le Finnish Meteorological Institute utilise des Labko Ice Detectors (LID) pour détecter le givrage atmosphérique [45]. La détection du givre par ce système est basée sur le refroidissement de fils à ultra-sons en raison de la glace. Le fil est enroulé autour d'un cylindre métallique qui peut être chauffé. Lorsque de la glace est détectée, le LID se dégivre lui-même par chauffage et est prêt à détecter un nouvel évènement de givrage après 5 à 10 minutes. Un détecteur de givre à la surface de la pale (Blade mounted Labko Ice Detector-BLID) est utilisé pour contrôler le système de dégivrage des pales. Les principaux dysfonctionnements du système de détection du givre sont dus aux composantes électroniques et au logiciel de détection. Le système de détection du givre est difficile à maintenir opérationnel en bout de pale en raison des conditions extrêmes de

fonctionnement, mais il est le seul moyen de détecter le givre lorsqu'il apparaît seulement en bout de pale.

Un autre moyen de détecter le givre est le bruit aérodynamique. Cette méthode permet la détection de très faibles accumulations de givre. En effet, les perturbations aérodynamiques induites par la présence de givre sur le bord d'attaque de la pale conduit à la création d'une couche limite turbulente à partir du bord d'attaque et donc une augmentation importante du niveau sonore et de la fréquence d'émission qui peut être clairement entendue dans l'entourage de l'éolienne [3]. Ce phénomène pourrait servir à la détection du givre. Mais à l'heure actuelle, le moyen le plus fiable de détecter le givrage des pales d'une éolienne reste cependant de calculer la différence entre la puissance de production estimée d'après les mesures des anémomètres situés sur l'éolienne et la puissance réellement produite. Un pourcentage d'erreur peut alors être fixé, 5% par exemple, à partir duquel le système de dégivrage est mis en route.

Le montage expérimental développé ici et utilisé pour un évènement de givrage précis enregistré à Murdochville (Québec) doit être validé par des essais sur site, en raison des rapports de mise à l'échelle importants. Il pourra permettre à terme de simuler le dégivrage de n'importe quel évènement de givrage mesuré sur site et ainsi quantifier les besoins énergétiques de dégivrage de tout site éolien, dès sa phase de conception.

TRAVAUX FUTURS

Il serait important de concevoir aujourd'hui des pales moins sensibles aux modifications de profils aérodynamiques et qui soient capables de fonctionner normalement avec du givre [3]. C'est l'idée que suit le Risø National Laboratory en étudiant des modifications de profils NACA afin de les rendre moins sensibles aux rugosités [46]. Ceci réduirait les besoins en termes de dégivrage.

Le calcul des coefficients de portance et traînée des profils recouverts des différentes formes de givre obtenues avec et sans dégivrage est très difficile en raison des problèmes de turbulence induits par la glace qui se forme sur la surface du profil. Cette turbulence peut être étudiée grâce à la simulation numérique directe (DNS, Direct Numerical Simulation), la simulation des grandes échelles ou macro-simulation (LES, Large Eddy Simulation) ou les modèles de turbulence. Ces derniers sont moins précis mais plus faciles à mettre en œuvre. Deux modèles sont à l'heure actuelle très utilisés par les centres de recherche : le modèle $\bar{k} - \varepsilon$ qui s'applique entre autres aux problèmes compressibles, bas Reynolds, renormalisé, combustion, le modèle $\bar{k} - \omega$, qui est une adaptation du modèle $\bar{k} - \varepsilon$, et le modèle $R_{ij} - \varepsilon$. [47]

Le modèle le plus utilisé pour évaluer la portance et la traînée du profil (propre et givré) est le modèle $\bar{k} - \varepsilon$. Ce modèle consiste à résoudre les équations de transport associées à l'énergie cinétique turbulente moyenne \bar{k} et son taux de dissipation ε ([48] et [47]). Il est actuellement utilisé pour des recherches sur la détermination des propriétés aérodynamiques du profil NACA 63415 recouvert de différentes formes de glace, à partir du logiciel FLUENT. Les formes de glace obtenues dans ce mémoire serviront à calculer la portance et la traînée des profils et permettront d'évaluer les performances d'une éolienne dont les pales sont recouvertes de ces formes de glace.

La mise en parallèle de ces différences de performance et de la consommation du système de dégivrage développé ici permettra de conclure quant à la rentabilité d'un tel système. Ce travail, réalisé lors de la conception d'un parc éolien permettra de quantifier les besoins énergétiques en termes de dégivrage et la rentabilité d'un système de dégivrage.

BIBLIOGRAPHIE

1. Association canadienne de l'énergie éolienne. 10 février 2006. *L'industrie de l'énergie éolienne au Canada enregistre un niveau record de croissance en 2005*.
2. Leclerc, Christophe; Masson, Christian. 2003. *Abnormally High Power Output of Wind Turbine in Cold Weather: A Preliminary Study*. Département de génie mécanique, ETS Montréal
3. Seifert, Henry. 2004. *Technical requirements for rotor blades operating in cold climate*. BOREAS VI Conference.
4. Fortin, Guy. 2003. *Simulation de l'accrétion de glace sur un obstacle bidimensionnel par la méthode des bissectrices et par la modélisation des ruisselets et des gouttes de surface*. Thèse de Doctorat en ingénierie, Université du Québec à Chicoutimi.
5. Hochart, Clément ; Fortin, Guy ; Perron, Jean et Ilinca, Adrian. 2005. *Simulation en soufflerie sur un profil NACA 63-415 des conditions de givrage relevées à Murdochville durant la campagne de mesure 2004-2005 selon une éolienne VESTAS V80 de 1.8 MW*, rapport d'expérimentation. Rapport interne. 95p.
6. Tammelin, Bengt ; Sääntti, Kristiina ; Dobesch, Hartwig ; Durstewich, Michael ; Ganander, Hans ; Kury, Georg; Laakso, Timo; Peltola, Esa; Ronsten, Göran. 2005. *Wind Turbines in Icing Environment: Improvement of Tools for Siting, Certification and Operation – New Icetools*. Finnish Meteorological Institute. Reports 2005:6.
7. Makkonen, Lasse; Laakso, Timo; Marjaniemi, Mauri; Finstad, Karen J. 2001. *Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines*. Wind Engineering Volume 25, n°.1, pp. 3-21.
8. Laakso, T; Holttinen, H; Ronsten, G; Tallhaug, L; Horbaty, R; Baring-Gould, I; Lacroix, A; Peltola, E; Tammelin, B. 2003. *State-of-the-art of wind energy in cold climates*.
9. Seifert, Henry. 1992. *Icing of Wind Turbine Rotor Blades During Operation*. BOREAS Conference, Wind power in icing conditions.

10. Mansson, Jesper. 2004. *Why De-icing of Wind Turbine Blades?* LM Glassfiber, Global WINDPOWER 2004.
11. Laakso, Timo; Talhaug, Lars; Ronsten, Goran; Horbaty, Robert; Baring-Gould, Ian; Lacroix, Antoine; Peltola, Esa. 2005. *Wind Energy Projects in Cold Climates 1. Edition 2005.*
12. Seifert, Henry; Westerhellweg, Annette; Kröning, Jürgen. 2003. *Risk analysis of ice throw from wind turbines.* BOREAS VI Conference.
13. Durstewitz, Michael. 2003. *On-site cold climate problems.* BOREAS VI Conference.
14. Laakso, Timo; Peltola, Esa. 2005. *Review on blade heating technology and future prospects.* VTT Processes. Finland. BOREAS VII Conference.
15. Messinger, B.L. 1953. *Equilibrium Temperature of an Unheated Icing Surface as a Function of Airspeed.* Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 20, n° 1, pp. 29-42.
16. Lozowski, F.H., Stallabras, J.R., Hearty, P.F. 1979. *The Icing of an Unheated Non-Rotating Cylinder in Liquid Water Droplet-Ice Crystal Clouds.* NRC Lab report n° LTR-LT-96, pp. 66.
17. Yukon Development Corporation. 2001. *The Winds of Change The story of wind generation in the Yukon.* Yukon Energy Corporation.
18. World Intellectual Property Organization. 1998. *A Method and a System for Deicing of Airfoil Wings of Composite Materials.* LM Glasfiber. International Publication number: WO 98/01340.
19. http://www.aerosafety.zodiac.com/aerazur/index-fr.php?p=sub_elastomer_deicing
20. Anderson, D. N.; Botura, G. C.; Broeren, A. P. 2001. *A study of scaling for intercycle ice accretion tests.* NASA.
21. Hau, Erich. 2006. *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics,* second edition. Springer. 783 p.
22. Weis, Timothy M. 2002. *Rime Ice Adhesion To Heated Surfaces.* Master of Science. Department of Mechanical Engineering, University of Alberta.

23. Patreau, Valérie. 1998. *Modélisation numérique d'un système électrothermique de dégivrage des pales d'éolienne à axe horizontal*. Master of Science. Département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal.
24. <http://www.north-rthn.org/french/frostline/Hiver96/1.html>
25. Hochart, Clément. 2006. *Simulation numérique et expérimentale de l'écoulement d'air et de l'accrétion de glace autour d'une pale d'éolienne*. Mémoire de maîtrise en ingénierie, Université du Québec à Rimouski.
26. Bak, Christian; Fuglsang, Peter; Johansen, Jeppe; Antoniou, Ioannis. 2000. *Wind Tunnel Tests of the NACA 63-415 and a Modified NACA 63-415 Airfoil*. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
27. Seifert, Henry ; Richert, Frank. 1998. *A recipe to estimate aerodynamics and loads on iced rotor blades*. BOREAS IV Conference.
28. Seifert, Henry; Richert, Frank. 1997. *Aerodynamics of iced airfoils and their influence on loads and power production*. European Wind Energy Conference.
29. Fortin, Guy ; Hochart, Clément ; Perron, Jean ; Ilinca, Adrian. 2005. *Caractérisation des conditions météorologiques et du givre sur le site de l'ancienne mine de Noranda à Murdochville durant la campagne de mesure 2004-2005*. Rapport interne. 166p.
30. Fortin, Guy ; Perron, Jean ; Ilinca, Adrian. 2006. *Caractérisation des conditions météorologiques et du givre sur le site de l'ancienne mine de Noranda à Murdochville durant la campagne de mesure 2005-2006*. Rapport interne. 165p.
31. Burton, Tony; Sharpe David; Jenkins, Nick; Bossanyi, Ervin. 2001. *Wind Energy Handbook*. John Wiley and Sons, Ltd.
32. Jamieson, Peter. 2004. *Evolution of modern wind turbine rotors*. Garrad Hassan.
33. McKittrick, Ladean R.; Cairns, Douglas S.; Mandell, John; Combs, David C.; Rabern, Donald A. and Van Luchene, R. Daniel. 2001. *Analysis of a Composite Blade Design for the AOC 15/50 Wind Turbine Using a Finite Element Model SANDIA REPORT*. SAND2001-1441 Unlimited Release Printed May 2001.

34. Mandell, J.F.; Samborsky, D.D., 2 mars 2006 Update. *DOE / MSU Composite Material Fatigue Database*. SAND97-3002.
35. Owens/Corning Fiberglas®. 1977. *Caractéristiques d'utilisation. Composites Fibreglass*. Leeman Seel House Ltd, England.
36. Duchesne, Marc ; Gagné, Catherine. 2006. *Conception d'un système de prévention du givre par éléments chauffants autocontrôlés*. Rapport final. Projet de conception en génie électrique I. Module d'ingénierie, Université du Québec à Chicoutimi.
37. Chapra, Steven C; Canale, Raymond P. 1988. *Numerical methods for engineers 2nd éd.* McGraw-Hill Inc.
38. Schlichting, Herman, T.; translated by Kestin J. 1979. *Boundary layer Theory*. 7th ed. McGraw-Hill, Montreal.
39. Mason, J. 1971. *The physics of clouds*. Oxford University Press, Ely House. London, England.
40. Anderson, David N. 2004. *Manual of Scaling Methods*. Ohio Aerospace Institute. NASA/CR-2004-212875.
41. Charpin, F.; Fasso, G. 1972. *Essais de givrage dans la grande soufflerie de Modane sur maquettes à échelle grandeur et échelle réduite*. L'aéronautique et l'astronautique n° 38, pp 23-31.
42. Eyglunest, Bernard. 1994. *Thermique théorique et pratique*. Paris Hermès.
43. www.fmi.fi/research_meteorology/meteorology_9.html
44. Aarnio, Esa; Partonen, Seppo. 2000. *Operational experience of arctic wind farms*. BOREAS V Conference.
45. Marjaniemi, Mauri; Laakso, Timo; Makkonen, Lasse; Wright, Johanna. 2001. *Results of Pori Wind Farm Measurements*. VTT Energy Reports 42/2001.
46. Makkonen, Lasse; Laakso, Timo; Marjaniemi, Mauri; Finstad, Karen, J. 2001. *Modelling and Prevention of Ice Accretion on Wind Turbines*. Wind Engineering Volume 25, n°. 1, pp. 3-21.
47. Bailly, Christophe ; Comte-Bellot, Geneviève. 2003. *Turbulence*. CNRS Editions, Paris.

48. Wilcox, David C. 1994. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, Inc.

ANNEXE A

DOCUMENTATION TECHNIQUE SUR LA FIBRE DE VERRE



PRODUCT INFORMATION

OC® FABRICS OC® DOUBLE BIAS FABRICS (±45°)

PRODUCT DESCRIPTION

OC® Double Bias Fabrics are a stitch-bonded composite reinforcement combining equal amounts of continuous fiber oriented in the +45° and -45° directions into a single fabric. This construction offers off-axis reinforcement without the need to rotate other materials on a bias. The versatile fabric, made from high-quality fibers, is available in a variety of widths and weights to meet your particular requirements. The input fibers are designed to give controlled wet-out and excellent laminate properties. Each fabric can be combined with a glass mat or veil for enhanced performance, surface finish or handling.

PRODUCT APPLICATION

OC Double Bias Fabrics offer superior structural performance in applications subject to extreme shear and torsion stress. These properties are ideal for applications such as wind blades, marine panels, and snowboards. These fabrics offer improved conformability over biaxial fabrics yet maintain comparable laminate properties, making them ideal for placement within complex parts. Reduced fabric print-through results in enhanced aesthetics on finished products while offering material and labor savings.

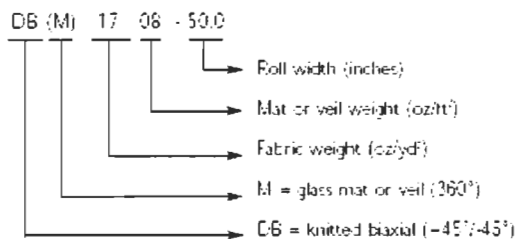
FEATURES

- CRIMP-FREE CONSTRUCTION
- OPPOSING ±45° FABRIC CONSTRUCTION OFFERS RESISTANCE TO TWISTING
- EXCELLENT CONFORMABILITY
- REDUCE PRINT-THROUGH
- CAN BE COMBINED WITH VARIOUS MATS (CONTINUOUS FILAMENT MAT, WET FORMED MAT, CHOPPED STRANDS AND VEIL)
- AVAILABLE IN A VARIETY OF WIDTHS AND WEIGHTS

PRODUCT BENEFITS

- IMPROVED FIBER ALIGNMENT AND MECHANICAL PROPERTIES
- FINISHED PARTS PERFORM UNDER EXTREME SHEAR AND TORSION STRESS
- IMPROVED PLACEMENT IN COMPLEX PARTS
- ENHANCED AESTHETICS WITH MATERIAL AND LABOR SAVINGS
- IMPROVED PRINT-THROUGH, COST-EFFECTIVE SECONDARY BONDING AND HANDLING
- OFFERS SOLUTIONS FOR WIDE RANGE OF APPLICATIONS

PRODUCT NOMENCLATURE





OC® FABRICS OC® DOUBLE BIAS FABRICS ($\pm 45^\circ$)

PHYSICAL PROPERTIES / AVAILABLE PRODUCTS

FABRIC STYLE	TOTAL WEIGHT (OZ./YD²)	0°	90°	+45°	-45°	MAT	DRY THICKNESS (INCHES)
DB120	11.6	0	0	5.6	5.6	0	0.021
DBM1208	19.3	0	0	5.6	5.6	7.6	0.037
DB170	17.6	0	0	8.6	8.6	0	0.029
DBM1708	24.9	0	0	8.6	8.6	7.6	0.044
DBM1708G	24.9	0	0	8.6	8.6	7.6	0.044
DBM1715	31.2	0	0	8.6	8.6	13.5	0.049
DBM1715G	31.2	0	0	8.6	8.6	13.5	0.049
DB240	24.7	0	0	12.1	12.1	0	0.034
DBM2408	32.3	0	0	12.1	12.1	7.6	0.048
DBM2408G	32.3	0	0	12.1	12.1	7.6	0.048
DBM2415	38.2	0	0	12.1	12.1	13.5	0.057
DBM2415G	38.2	0	0	12.1	12.1	13.5	0.057

SAMPLE MECHANICAL PROPERTIES

Sample Mechanical Properties of Laminate based on DB170 (50% glass content by weight).

	ENGLISH UNITS	SI UNITS
Tensile (ASTM D 638)		
Strength	39.8 ksi	274 MPa
Modulus	2.18 msi	15.0 GPa
Compression (ASTM D 695)		
Strength	36.6 ksi	252 MPa
Modulus	2.06 msi	14.2 GPa
Flexural (ASTM D 790)		
Strength	69.9 ksi	482 MPa
Modulus	2.00 msi	13.8 GPa

Sample Mechanical Properties of Laminate based on DBM1708 (50% glass content by weight).

	ENGLISH UNITS	SI UNITS
Tensile (ASTM D 638)		
Strength	39.8 ksi	274 MPa
Modulus	2.18 msi	15.0 GPa
Compression (ASTM D 695)		
Strength	36.6 ksi	252 MPa
Modulus	2.06 msi	14.2 GPa
Flexural (ASTM D 790)		
Strength	69.9 ksi	482 MPa
Modulus	2.00 msi	13.8 GPa



COMPOSITE SOLUTIONS



THE PINK PANTHER™

OWENS CORNING
WORLD HEADQUARTERS
ONE OWENS CORNING PARKWAY
TOLEDO, OHIO 43660
1-800-GET PINK
www.owenscorning.com/composites

EUROPEAN OWENS CORNING
FIBERGLAS S.A.
CHAUSSÉE DE LA HULPE, 166
B-1170-EPUSEELS
BELGIUM
32.2.574.82.11

OWENS CORNING LATIN AMERICA
AV. DAS NAÇÕES UNIDAS, 17.891-30, AND.
CEP - 04755-100
SÃO PAULO, BRAZIL
55.11.5514.2900

OWENS CORNING ASIA/PACIFIC
HANCHI BUILDING 3F
1-2-9 SHIKAGAKEN, MINATO-KU
TOKYO, 105-0011 - JAPAN
81.3.5733.1671

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this data sheet shall not be construed as representations or warranties of or as inducements to infringe any patent or violate any law, safety code or insurance regulation.

THE PINK PANTHER™ is © 1964-2003 Metro-Goldwyn-Mayer Studios Inc. All rights reserved. The color PINK is a registered trademark of Owens Corning.
Pub No. 57910-D October 2003 Copyright © 2003 Owens Corning Produced by mcs communications



PRODUCT INFORMATION

OC® FABRICS OC® UNIDIRECTIONAL FABRICS (0° OR 90°)

PRODUCT DESCRIPTION

OC® Unidirectional Fabric is a composite reinforcement designed for applications requiring a high concentration of reinforcement in only one direction.

This is achieved by placing continuous fibers in either a 0° or 90° direction. These fibers are held in place by either interweaving a lightweight hot melt yarn to lock the unidirectional fibers in place, or by stitching the fibers in place using a stitch yarn. The versatile fabric, made from high-quality fibers, is available in a variety of widths and weights to meet your particular requirements. The input fibers are designed to give controlled wet-out and excellent laminate properties. Each fabric can be combined with a glass mat or veil for enhanced performance or surface finish.

PRODUCT APPLICATION

OC® Unidirectional Fabrics provide excellent strength and stiffness along the fiber direction. They also provide the highest ratio of axial strength to weight. This combination of properties makes these fabrics ideal for demanding applications with a high aspect ratio (length to width ratio) such as wind blades, poles, and stringers. These fabrics are also useful in applications where a discrete area requires additional strength or stiffness. Wrapping of existing structural components, such as columns and beams, with unidirectional fabrics could also greatly increase the lifespan and performance of these critical load-bearing members. These fabrics are also commonly used in FRP pipe and fittings for increased strength.

FEATURES

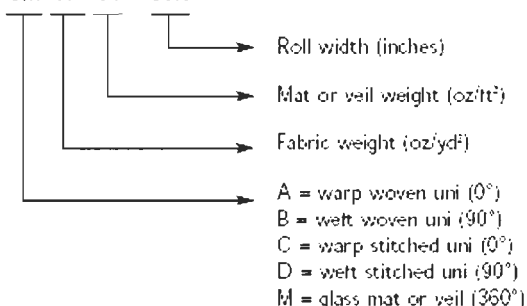
- MAXIMIZED AXIAL FIBER CONTENT
- IMPROVED LONGITUDINAL STRENGTH, STIFFNESS, AND FLEX
- ECONOMICAL METHOD TO DELIVER UNIDIRECTIONAL REINFORCEMENT
- IMPROVED STRENGTH WITHOUT ADDING THICKNESS AT COMPARABLE STIFFNESS
- AVAILABLE IN A VARIETY OF WIDTHS AND WEIGHTS

PRODUCT BENEFITS

- REDUCED RESIN USAGE AND PART WEIGHT
- FINISHED PARTS PERFORM UNDER EXTREME TENSILE AND FLEXURAL STRESS
- LOWER FINISHED PART COST
- ENHANCED PERFORMANCE FROM LIGHTER LAMINATES
- OFFERS DESIGN FLEXIBILITY FOR WIDE RANGE OF APPLICATIONS

PRODUCT NOMENCLATURE

CM 17 01 - 50.0





OC® FABRICS OC® UNIDIRECTIONAL FABRICS (0° OR 90°)

PHYSICAL PROPERTIES / AVAILABLE PRODUCTS

FABRIC STYLE	TOTAL WEIGHT (OZ/YD²)	0°	90°	+45°	-45°	MAT	DRY THICKNESS (INCHES)
A130	13.1	12.8	0	0	0	0	0.023
A260	25.6	25.3	0	0	0	0	0.036
A280	28.2	27.8	0	0	0	0	0.035
CM1701	16.6	15.4	0	0	0	0.7	0.031
CM1708	24.0	15.4	0	0	0	7.6	0.041
D060	6.1	0	5.9	0	0	0	0.013
D075	7.5	0	7.4	0	0	0	TBD
D092	9.1	0	9.0	0	0	0	0.019
D135	15.5	0	15.4	0	0	0	0.021

SAMPLE MECHANICAL PROPERTIES

Sample Mechanical Properties of Laminate based on A260
(50% glass content by weight).

	ENGLISH UNITS	SI UNITS
Tensile (ASTM D 638)		
Strength	73.7 ksi	508 MPa
Modulus	3.51 msi	24.2 GPa
Compression (ASTM D 695)		
Strength	44.1 ksi	304 MPa
Modulus	2.80 msi	19.3 GPa
Flexural (ASTM D 790)		
Strength	109.3 ksi	753 MPa
Modulus	3.61 msi	24.9 GPa

Sample Mechanical Properties of Laminate based on
CM1701 (50% glass content by weight).

	ENGLISH UNITS	SI UNITS
Tensile (ASTM D 638)		
Strength	74.7 ksi	515 MPa
Modulus	4.20 msi	28.9 GPa
Compression (ASTM D 695)		
Strength	54.7 ksi	377 MPa
Modulus	3.39 msi	23.4 GPa
Flexural (ASTM D 790)		
Strength	102.6 ksi	707 MPa
Modulus	2.96 msi	20.4 GPa



INNOVATION FOR LIFE™

COMPOSITE SOLUTIONS



**OWENS CORNING
WORLD HEADQUARTERS**
ONE OWENS CORNING PARKWAY
TOLEDO, OHIO 43669
1.800.GET.PINK
www.owenscorning.com/composites

OWENS CORNING LATIN AMERICA
AV. DAS NAÇÕES UNIDAS, 17.891-30, AND.
CEP - 04755-100
SÃO PAULO, BRAZIL
55.11.5514.7900

**EUROPEAN OWENS CORNING
FIBERGLAS S.A.**
CHAUSÉE DE LA HULPE, 166
B-1110 BRUSSELS
BELGIUM
32.2674.82.11

OWENS CORNING ASIAPACIFIC
HANCHI BUILDING 3F
1-2-9 SHIKAGAKEN, MINATOKU
TOKYO, 105-0011 - JAPAN
81.3.5733.1671

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this data sheet shall not be construed as representations or warranties or as inducements to violate any patent or violate any law, safety code or insurance regulation.

THE PINK PANTHER™ & © 1994-2003 Metro-Goldwyn-Mayer Studios Inc. All rights reserved. The color PINK is a registered trademark of Owens Corning.
Pub No. 5194-1-D October 2003 Copyright © 2003 Owens Corning Produced by mass communication

ANNEXE B

INTERFACE DU PROGRAMME VISUAL BASIC

Thermostat

Entrées:

Attentes thermophysiques:

Température à atteindre (°C)

Température extérieure (°C)

Facteur de Convection

Asservissement:

Temps de réponse à 95% (min)

Facteur de dépassement voulu (ratio)

P **I** **D**

Calculer

Puissances de chaque élément en Watt

Températures de chaque élément (°C)

Intérieur	Centre	Extérieur
10 <input type="text"/>	2 <input type="text"/>	4 <input type="text"/>
9 <input type="text"/>	1 <input type="text"/>	3 <input type="text"/>
11 <input type="text"/>	5 <input type="text"/>	7 <input type="text"/>
12 <input type="text"/>	6 <input type="text"/>	8 <input type="text"/>

Haut

Bas

Puissances de chaque élément (W)

Centre	Intérieur
2 <input type="text"/>	4 <input type="text"/>
1 <input type="text"/>	3 <input type="text"/>
5 <input type="text"/>	7 <input type="text"/>
6 <input type="text"/>	8 <input type="text"/>

Avant de débiter:

- Entrez le nom du fichier d'enregistrement :
- Calculez les constantes P, I et D si besoin
- Vérifiez les valeurs des entrées

Débuter

Arrêter

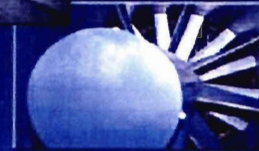
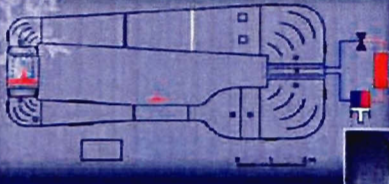
ANNEXE C

LA SOUFFLERIE

Laboratoire International
des matériaux antigivre

LIMA ❄️ **AMIL**

Anti-icing Materials
International Laboratory



Soufflerie réfrigérée

Tunnel :	réfrigéré avec recirculation en boucle fermée
Dimensions de la section d'essai :	0,6 m de haut 1,5 m de long 0,5 m de large
Températures d'opération :	-30°C à +25°C et jusqu'à -50°C avec azote liquide
Vitesse du vent :	jusqu'à 70 m/s
Alimentation électrique :	240 VAC 1ø 40 A 208 VAC 3ø 30 A
Ventilateur :	diamètre de 0,9 m et puissance de 50 hp à 3600 rpm
Acquisition de données : (16 canaux)	humidité relative température vitesse du vent pression atmosphérique

ESSAIS COURANTS

- Évaluation aérodynamique des fluides dégivants et antigivrants appliqués sur les avions au sol selon les procédures normalisées de l'Aerospace Material Specifications AMS 1424 et AMS 1428
- Étalonage des tubes de Pitot et anémomètres à basses et hautes vitesses

Refrigerated Wind Tunnel

Tunnel :	refrigerated closed-loop
Test section dimensions :	0.6 m high 1.5 m long 0.5 m wide
Operating temperature range :	-30°C to +25°C and down to -50°C using liquid nitrogen
Wind speed:	up to 70 m/s
Available power :	240 VAC 1ø 40 A 208 VAC 3ø 30 A
Fan :	0.9 m diameter, 50 hp at 3600 rpm
Data acquisition : (16 channels)	relative humidity temperature wind speed atmospheric pressure

TYPICAL TESTS

- Aerodynamic acceptance testing of aircraft ground de-icing fluids according to Aerospace Material Specifications AMS 1424 and AMS 1428
- Pitot tubes and anemometer calibration at low and high speeds



Université du Québec à Chicoutimi
www.amil.chicoutimi.que.ca

ANNEXE D

ÉTALONNAGES

D.1 Étalonnage des teneurs en eau dans la zone d'essais

D.1.1 Principe

L'étalonnage des teneurs en eau consiste à régler le débit d'eau dans chaque gicleur (Figure A-1) pour obtenir la teneur en eau liquide désirée, ainsi qu'une répartition la plus homogène possible du givrage sur la largeur du profil dans la section d'essai. En effet, les effets de bord ainsi que les défauts de conception de la soufflerie qui impliquent respectivement un échange thermique non négligeable avec l'extérieur.

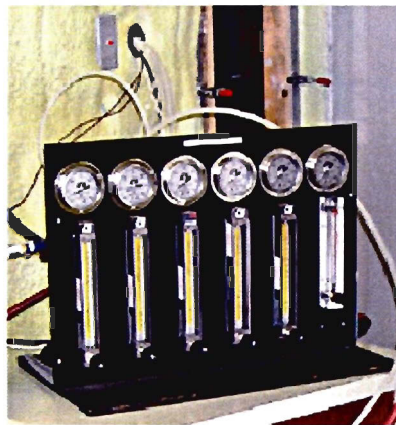


Figure D-1. Panneau de contrôle du débit d'eau dans chacun des cinq gicleurs.

Les valeurs expérimentales retenues requièrent trois étalonnages de teneur en eau :

Étalonnage 1 : Vitesse 20 m/s et LWC 0,4 kg/m³

Étalonnage 2 : Vitesse 30 m/s et LWC 0,4 kg/m³

Étalonnage 3 : Vitesse 40 m/s et LWC 0,4 kg/m³

À titre d'exemple, l'interface du logiciel utilisé pour calculer la teneur en eau liquide est présentée à la Figure B-3 avec les résultats de la première itération de l'étalonnage 1.

Etalonnage de la teneur en eau liquide									
Imprimer Enregistrer Quitter									
Essai	1	Date	06-06-26	Calcul de la teneur en eau liquide					
Pression d'air gicleurs (psi)	30	Diamètre du cylindre (mm)	25.4	Methode coefficient collection					
Durée étalonnage (min)	50	Longueur du cylindre (m)	0.4927	WW : Walton et Woolcock					
Vitesse (m/s)	20	Hauteur section essai (m)	0.6	FS : Finstad et Stallabrass					
Température (C)	-11	Vitesse corrigée (m/s)	20.88	LB : Langmuir et Blodgett					
Pression (kPa)	101.3	Nombre de Stokes		WW	FS	LB			
Diamètre gouttelette (µm)	27.6	Paramètre phi		3.57	3.57	3.57			
Poids total (gr)	408.5	Nombre de Reynolds, Gouttelettes		612.	612.	612.			
Poids du cylindre (gr)	161.9	Coefficient de Captation		46.7	46.7	46.7			
Poids du support (gr)	63.1	Teneur Eau Liquide, Épaisse (g/m³)		0.699	0.571	0.559			
Poids de glace (gr)	183.5	Teneur Eau Liquide, Laforte (g/m³)		0.286	0.350	0.357			
Épaisseur moyenne (mm)	4.37	Teneur Eau Liquide, Jones (g/m³)		0.282	0.345	0.353			
Écart type (mm)	0.95			0.280	0.343	0.350			
Erreur (%)	21.80								
		Densité de la glace (kg/m³)		Mesurée	Laforte	Jones			
		Épaisseur moyenne (mm)		911.	832.	789.			
				4.37	4.95	4.73			
Position mesure (cm)	-15.00	-11.25	-7.50	-3.75	0.00	3.75	7.50	11.25	15.00
Débitmètre	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Pression eau gicleurs (psi)	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Diamètre cylindre givré (mm)	31.88	32.61	32.62	32.09	34.85	34.46	35.53	37.03	36.19
Épaisseur de glace (mm)	3.24	3.61	3.61	3.35	4.73	4.63	5.07	5.82	5.40

Figure D-2. Logiciel d'étalonnage de la teneur en eau liquide.

Les étalonnages sont réalisés du 26 juin au 02 juillet 2006 dans la soufflerie réfrigérée du LIMA à l'université du Québec à Chicoutimi.

D.1.2 Étalonnage 1

L'étalonnage 1 a été réalisé en trois itérations. La valeur de teneur en eau liquide obtenue lors de l'itération 2 a été validée lors de l'itération 3, dans le but de vérifier la reproductibilité des résultats.

L'itération 1 (figure 2 et tableau 1) a duré 50 minutes à une température de -11°C. Une masse de 183,5 g de glace a été accumulée et la teneur en eau liquide calculée est de 0,350 kg/m³. Les débits des gicleurs ont donc été augmentés lors de la deuxième itération.

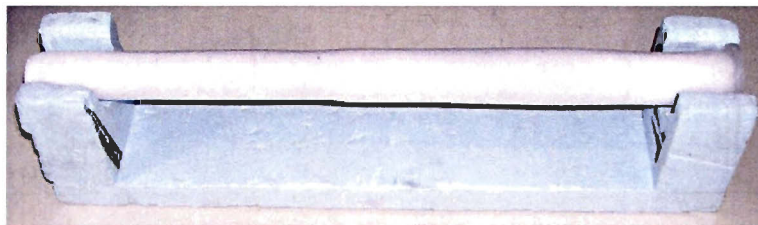


Figure D-3. Cylindre givré étalonnage 1 itération 1

Tableau D-1. Résultats de l'itération 1 de l'étalonnage 1.

	Gicleur 1		Gicleur 2		Gicleur 3		Gicleur 4		Gicleur 5
Position équivalente sur le cylindre (cm)	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
Débit du gicleur	23		22		22		22		22
Diamètre du cylindre givré (mm)	31.88	32.61	32.62	32.09	34.85	34.46	35.53	37.03	36.19

Les itérations 2 et 3 ont duré 45 minutes, respectivement à $-10,7^{\circ}\text{C}$ et $-11,5^{\circ}\text{C}$. L'itération 2 a accumulé 186,9 g de glace et la teneur en eau liquide calculée est de $0,397 \text{ kg/m}^3$.

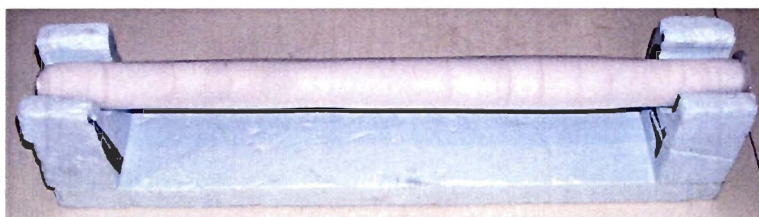


Figure D-4. Cylindre givré étalonnage 1 itération 2.

Tableau D-2. Résultats de l'itération 2 de l'étalonnage 1.

	Gicleur 1		Gicleur 2		Gicleur 3		Gicleur 4		Gicleur 5
Position équivalente sur le cylindre (cm)	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
Débit du gicleur	25		25		24		24		23
Diamètre du cylindre givré (mm)	32.67	33.71	33.63	33.36	34.84	35.02	36.27	36.58	35.18

L'itération 3 a accumulé 185,5 g de glace et la teneur en eau liquide calculée est de $0,395 \text{ kg/m}^3$.

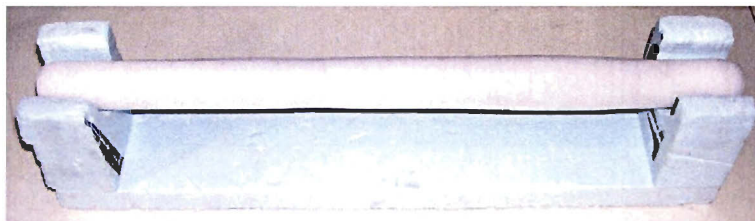


Figure D-5. Cylindre givré étalonnage 1 itération 3

Tableau D-3. Résultats de l'itération 3 de l'étalonnage 1.

	Gicleur 1		Gicleur 2		Gicleur 3		Gicleur 4		Gicleur 5
Position équivalente sur le cylindre (cm)	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
Débit du gicleur	26		25		24		23		23
Diamètre du cylindre givré (mm)	34.09	34.32	33.83	33.69	34.84	34.95	35.95	36.83	35.54

D.1.3 Étalonnage 2

L'étalonnage 2 a été réalisé en deux itérations. La valeur de teneur en eau liquide obtenue lors de la première itération a été validée par la deuxième itération, dans le but de vérifier la reproductibilité des résultats.

L'itération 1 a duré 30 minutes à $-10,6^{\circ}\text{C}$. La masse d'eau accumulée est de 210,4 g et la teneur en eau liquide calculée est de $0,394 \text{ kg/m}^3$.

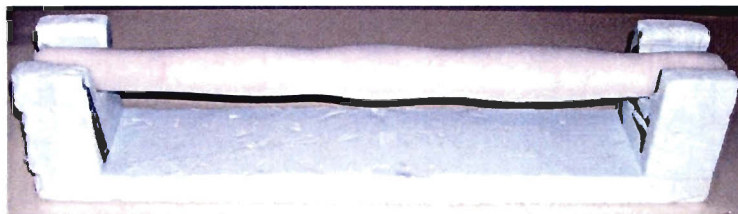


Figure D-6. Cylindre givré étalonnage 2 itération 1.

Tableau D-4. Résultats de l'itération 1 de l'étalonnage 2.

	Gicleur 1		Gicleur 2		Gicleur 3		Gicleur 4		Gicleur 5
Position équivalente sur le cylindre (cm)	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
Débit du gicleur	28		28		28		28		28
Diamètre du cylindre givré (mm)	31.07	34.51	35.4	35.13	40.15	35.45	40	40.82	36.19

L'itération 2 a duré 26 minutes à $-10,5^{\circ}\text{C}$. La masse d'eau accumulée est de 185,4 g et la teneur en eau liquide calculée est de $0,405 \text{ kg/m}^3$.

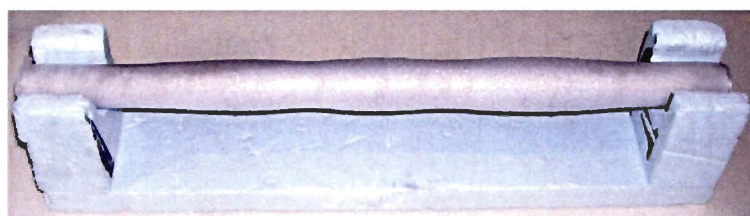


Figure D-7. Cylindre givré étalonnage 2 itération 2.

Tableau D-5. Résultats de l'itération 2 de l'étalonnage 2.

	Gicleur 1		Gicleur 2		Gicleur 3		Gicleur 4		Gicleur 5
Position équivalente sur le cylindre (cm)	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
Débit du gicleur	30		29		28		28		28
Diamètre du cylindre givré (mm)	32.28	35.17	34.97	33.05	37.26	34.19	37.03	38.35	35.86

D.1.4 Étalonnage 3

L'étalonnage 3 a été réalisé en 6 itérations.

L'itération 1 a duré 20 minutes à -9.1°C . La masse d'eau accumulée est de 112.5 g et la teneur en eau liquide calculée est de $0,235 \text{ kg/m}^3$.

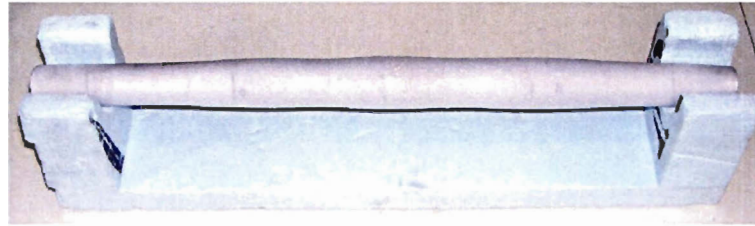


Figure D-8. Cylindre givré étalonnage 3 itération 1.

Tableau D-6. Résultats de l'itération 1 de l'étalonnage 3.

	Gicleur 1		Gicleur 2		Gicleur 3		Gicleur 4		Gicleur 5
Position équivalente sur le cylindre (cm)	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
Débit du gicleur	26		26		25		25		25
Diamètre du cylindre givré (mm)	28.51	31.62	33.47	32.15	35.32	33.46	33.8	34.31	31.77

L'itération 2 a duré 20 minutes à $-10,2^{\circ}\text{C}$. La masse d'eau accumulée est de 150 g et la teneur en eau liquide calculée est de $0,307\text{ kg/m}^3$.

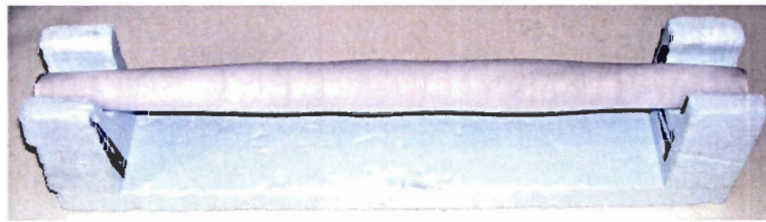


Figure D-9. Cylindre givré étalonnage 3 itération 2.

Tableau D-7. Résultats de l'itération 2 de l'étalonnage 3.

	Gicleur 1		Gicleur 2		Gicleur 3		Gicleur 4		Gicleur 5
Position équivalente sur le cylindre (cm)	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
Débit du gicleur	29		28		26		27		28
Diamètre du cylindre givré (mm)	30.7	33.21	35.67	34.94	37.13	34.46	37.08	36.37	31.99

L'itération 3 a duré 20 minutes à $-6,5^{\circ}\text{C}$. La masse d'eau accumulée est de 181 g et la teneur en eau liquide calculée est de $0,365\text{ kg/m}^3$.

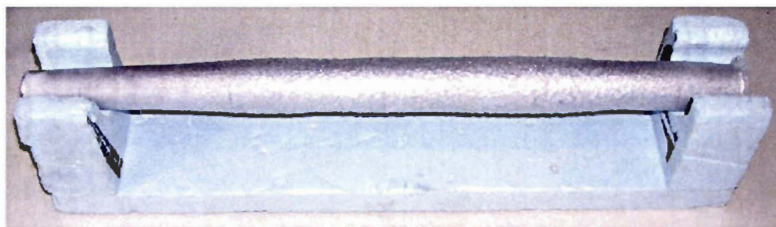


Figure D-10. Cylindre givré étalonnage 3 itération 3.

Tableau D-8. Résultats de l'itération 3 de l'étalonnage 3.

	Gicleur 1		Gicleur 2		Gicleur 3		Gicleur 4		Gicleur 5
Position équivalente sur le cylindre (cm)	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
Débit du gicleur	33		32		31		32		33
Diamètre du cylindre givré (mm)	31.46	35.14	37.89	36.43	37.4	37.47	38.84	39.12	34.73

L'itération 4 a duré 20 minutes à -8 °C. La masse d'eau accumulée est de 220.2 g et la teneur en eau liquide calculée est de 0,436 kg/m³.

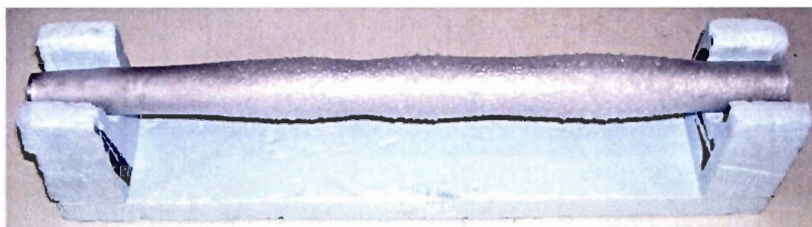


Figure D-11. Cylindre givré étalonnage 3 itération 4.

Tableau D-9. Résultats de l'itération 4 de l'étalonnage 3.

	Gicleur 1		Gicleur 2		Gicleur 3		Gicleur 4		Gicleur 5
Position équivalente sur le cylindre (cm)	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
Débit du gicleur	37		35		35		35		36
Diamètre du cylindre givré (mm)	32.11	36.89	40.78	35.53	41.68	38.15	38.02	42.91	40.47

L'itération 5 a duré 20 minutes à -10 °C. La masse d'eau accumulée est de 207.7 g et la teneur en eau liquide calculée est de 0,414 kg/m³.

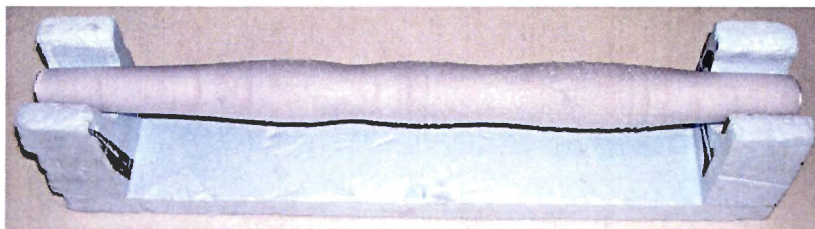


Figure D-12. Cylindre givré étalonnage 3 itération 5.

Tableau D-10. Résultats de l'itération 5 de l'étalonnage 3.

	Gicleur 1		Gicleur 2		Gicleur 3		Gicleur 4		Gicleur 5
Position équivalente sur le cylindre (cm)	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
Débit du gicleur	36		33		32		33		35
Diamètre du cylindre givré (mm)	32.44	37.2	40.45	34.79	39.23	37.21	39.07	41.58	38.12

L'itération 6 a duré 20 minutes à -10°C . La masse d'eau accumulée est de 204.8 g et la teneur en eau liquide calculée est de $0,408\text{ kg/m}^3$.

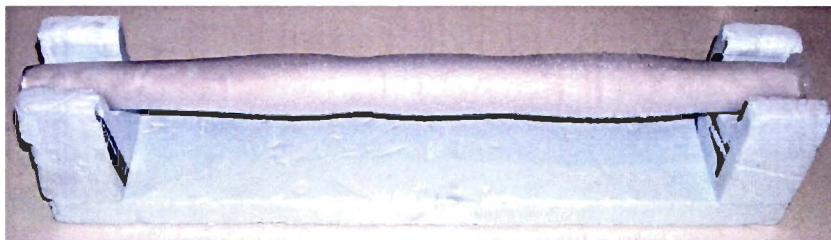


Figure D-13. Cylindre givré étalonnage 3 itération 6.

Tableau D-11. Résultats de l'itération 6 de l'étalonnage 3.

	Gicleur 1		Gicleur 2		Gicleur 3		Gicleur 4		Gicleur 5
Position équivalente sur le cylindre (cm)	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
Débit du gicleur	36		32		32		32		35
Diamètre du cylindre givré (mm)	31.78	35.91	38.61	34.32	38.66	37.34	38.33	41.25	39.31

D.2 Étalonnage des thermocouples

L'étalonnage des thermocouples est réalisé à trois températures différentes, dans le but de tracer la courbe caractéristique de la réponse de chaque thermocouple. La Figure B-14 présente le matériel utilisé pour cet étalonnage. De l'eau à 23 °C, de l'eau à 0 °C et un fluide à -18 °C ont été utilisés pour déterminer les équations caractéristiques de chaque thermocouple.

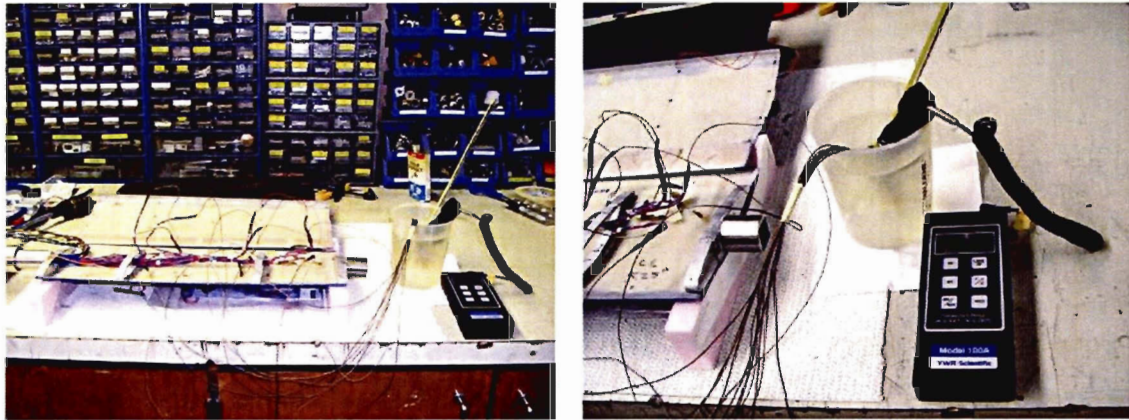


Figure D-14. Étalonnage des thermocouples.

Les résultats de cet étalonnage sont utilisés pour déterminer l'équation caractéristique de chaque thermocouple qui sera introduite dans le programme de contrôle du chauffage. Les équations des différents thermocouples sont :

$$Th_e 0 = 75.209.U - 150.4$$

$$Th_i 0 = 76.53.U - 130.37$$

$$Th_e 1 = 76.645.U - 133.12$$

$$Th_i 1 = 75.209.U - 140.63$$

$$Th_e 2 = 125.35.U - 205.56$$

$$Th_i 2 = 76.53.U - 145.67$$

$$Th_e 3 = 76.53.U - 147.97$$

$$Th_i 3 = 75.068.U - 151.37$$

U est le signal (tension) envoyée par les thermocouples à l'ordinateur.

D.3 Étalonnage de l'angle d'attaque du profil

L'angle d'attaque du profil est étalonné à l'aide d'un rapporteur d'angle. La précision est de $\pm 1^\circ$. La Figure D-15 présente le rapporteur servant à mesurer l'angle du profil et ainsi déterminer l'équation caractéristique servant à fixer l'angle dans le programme « Soufflerie 2000 » :

$$\alpha = -54.315.U + 132.31$$

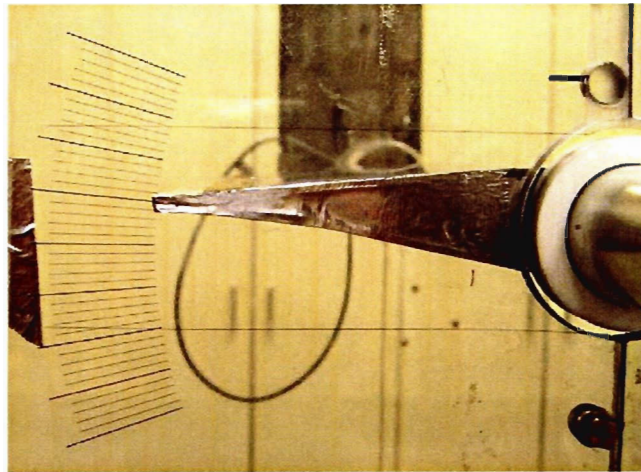


Figure D-15. Étalonnage de l'angle d'attaque du profil.

ANNEXE E

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES (DÉTAILS)

Tableau E-1. Conditions expérimentales de la première série de tests (dégivrage).

N° Essai	Vitesse dans la zone d'essai	Température théorique dans la soufflerie	Durée du test	Température réelle moyenne dans la soufflerie	Écart type relatif des températures	Conditions de dégivrage	
						h1	Tc
1-0-1	20	0	14'30"	-0.40	-0.178	0.9	2
1-0-2	20	0	14'30"	-0.09	-0.941	0.9	2
1-1.5-1	20	-1.5	14'30"	-1.34	-0.081	0.9	2
1-1.5-2	20	-1.5	14'30"	-1.50	-0.072	0.9	2
1-1.5-3	20	-1.5	14'30"	-1.43	-0.358	0.9	2
1-1.5-4	20	-1.5	14'30"	-1.47	-0.350	0.1	2
1-1.5-5	20	-1.5	14'30"	-1.50	-0.360	0.05	2
1-6.5-1	20	-6.5	14'18"	-6.27	-0.020	0.9	2
1-6.5-2	20	-6.5	14'18"	-6.45	-0.026	0.9	2
1-6.5-3	20	-6.5	14'18"	-6.46	-0.085	3	2
1-6.5-4	20	-6.5	14'18"	-6.51	-0.089	5	2
1-16.3-1	20	-16.3	13'54"	-16.51	-0.014	0.9	2
1-16.3-2	20	-16.3	13'54"	-16.37	-0.011	0.9	2
2-0-1	30	0	17'06"	-0.16	-0.654	0.9	2
2-0-2	30	0	17'06"	-0.29	-0.793	0.9	2
2-4.5-1	30	-4.5	16'54"	-4.21	-0.090	0.9	2
2-4.5-2	30	-4.5	16'54"	-4.26	-0.088	0.9	2
2-4.5-3	30	-4.5	16'54"	-4.56	-0.048	0.9	2
2-4.5-4	30	-4.5	16'54"	-4.50	-0.080	3	2
2-4.5-5	30	-4.5	16'54"	-4.71	-0.097	3	4
2-14.5-1	30	-14.5	16'36"	-14.97	-0.019	0.9	2
2-14.5-2	30	-14.5	16'36"	-14.50	-0.015	0.9	2
3-0-1	40	0	21'48"	-0.39	-0.708	0.9	2
3-0-2	40	0	21'48"	-0.45	-0.811	0.9	2
3-0-3	40	0	21'48"	0.14	1.812	2	2
3-0-4	40	0	21'48"	-0.09	-2.977	0.9	2
3-0-5	40	0	21'48"	0.04	4.012	0.1	2
3-0-6	40	0	21'48"	0.08	1.720	0.01	2
3-3.5-1	40	-3.5	21'42"	-3.03	-0.141	0.9	2
3-3.5-2	40	-3.5	21'42"	-3.16	-0.131	0.9	2
3-3.5-3	40	-3.5	21'42"	-3.30	-0.155	3	2
3-3.5-4	40	-3.5	21'42"	-3.26	-0.139	5	2
3-13-1	40	-13	21'24"	-13.21	-0.082	0.9	2
3-13-2	40	-13	21'24"	-13.57	-0.015	0.9	2

Tableau E-2. Conditions expérimentales de la première série de tests (givrage).

N° Essai	Vitesse dans la zone d'essai	Température théorique dans la soufflerie	Durée du test	Température réelle moyenne dans la soufflerie	Écart type relatif des températures
1-1.5-G1	20	-1.5	14'30"	-1.57	-0.361
1-1.5-G2	20	-1.5	14'30"	-1.98	-0.074
1-1.5-G3	20	-1.5	14'30"	-2.05	-0.055
1-6.5-G1	20	-6.5	14'18"	-6.23	-0.090
1-6.5-G2	20	-6.5	14'18"	-6.61	-0.015
1-6.5-G3	20	-6.5	14'18"	-6.57	-0.020
1-16-G1	20	-16.3	13'54"	-16.48	-0.016
1-16-G2	20	-16.3	13'54"	-16.26	-0.017
2-0-G	30	0	17'06"	0.23	0.325
2-4.5-G1	30	-4.5	16'54"	-4.53	-0.091
2-4.5-G2	30	-4.5	16'54"	-5.23	-0.037
2-4.5-G3	30	-4.5	16'54"	-4.66	-0.025
2-14.5-G1	30	-14.5	16'36"	-14.57	-0.013
2-14.5-G2	30	-14.5	16'36"	-14.11	-0.029
3-0-G1	40	0	21'48"	-0.02	-7.243
3-0-G2	40	0	21'48"	0.05	3.286
3-0-G3	40	0	21'48"	-0.26	-0.745
3-0-G4	40	0	21'48"	-0.39	-0.603
3-3.5-G1	40	-3.5	21'42"	-3.21	-0.143
3-3.5-G2	40	-3.5	21'42"	-2.30	-0.283
3-3.5-G3	40	-3.5	21'42"	-3.82	-0.042
3-3.5-G4	40	-3.5	21'42"	-3.36	-0.089
3-3.5-G5	40	-3.5	21'42"	-3.04	-0.061
3-13-G1	40	-13	21'24"	-9.92	-0.116
3-13-G2	40	-13	21'24"	-12.01	-0.055
3-13-G3	40	-13	21'24"	-12.17	-0.058